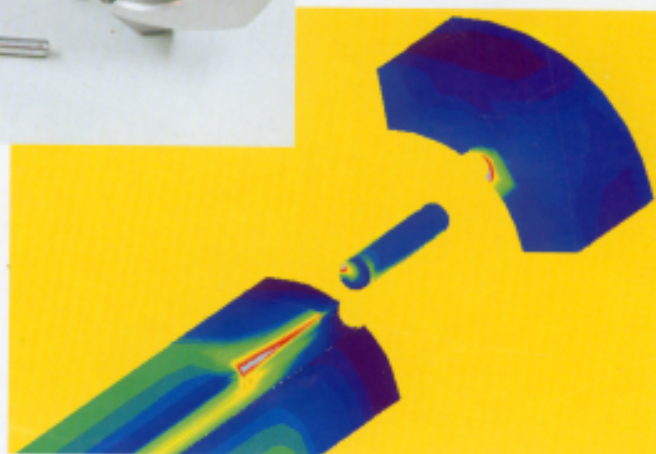
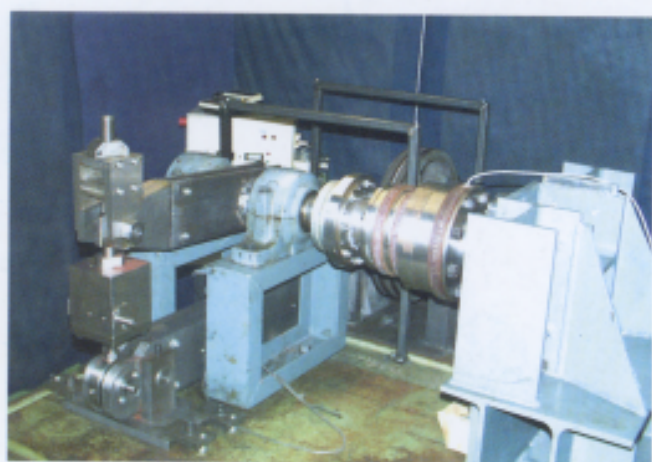




**Institut für Maschinenwesen**

Mitteilung Nr. 26 (2001)



Mitteilungen aus dem  
**Institut für Maschinenwesen**  
der  
Technischen Universität Clausthal  
**Nr. 26**

(November 2001)

**Herausgeber:**

Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Peter Dietz

**Redaktion und Layout:**

Dr.-Ing. Günter Schäfer  
Dipl.-Ing. Hagen Birkholz

**Anschrift:**

Institut für Maschinenwesen  
Technische Universität Clausthal  
Robert-Koch-Str. 32  
D-38678 Clausthal-Zellerfeld  
Tel: (0 53 23) 72-22 70  
Fax: (0 53 23) 72-35 01  
E-Mail: [info@imw.tu-clausthal.de](mailto:info@imw.tu-clausthal.de)  
<http://www.imw.tu-clausthal.de>

ISSN 0947-2274

**Titelbild:**

Das Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen führt u.a. Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Welle-Nabe-Verbindungen durch. Das Titelbild verdeutlicht den Einklang von Versuch, Simulation und technischer Anwendung am Beispiel einer Längsstiftverbindung.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort .....</b>	<b>1</b>
 <b>Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen</b>	
Schäfer, G.: Welle-Nabe-Verbindungen unter besonderen geometrischen Rahmenbedingungen .....	3
Quingsong, H.: Zur Simulation der Beanspruchung einer drehmomentbelasteten Zahnwellen-Verbindung mit Verzahnungsauslauf unter Verwendung des Finite-Elemente-Programmsystems ANSYS .....	9
Dschiwischow, W.; Niklaus, J.: Analyse der aktuellen Zahnwellenverbindungsnormen DIN 5480 und ISO 4156 .....	13
Mupende, I.: Schalentheorie oder Ringtheorie? Ein Beitrag zur Dimensionierung des Trommelmantels .....	17
Grünendick, T.: Das „hydraulische Aufweiten“ im neuen Gewand - IHF sorgt für festen Presssitz .....	21
Birkholz, H.: Untersuchungen zum Beanspruchungsverhalten spielbehafteter Längsstiftverbindungen .....	27
 <b>Konstruktionsmethodik und rechnerunterstützte Produktentwicklung</b>	
Dietz, P.; Grünendick, T.: Bauteilkonstruktion mit kombinierten Werkstoffen – Möglichkeiten und Grenzen am Beispiel verfahrenstechnischer Maschinen .....	33
Goltz, M.: Konzeption eines integrierten Prozessmanagements in der Produktentwicklung .....	49
Trenke, D.: Die Rapid Tooling Verfahrenskette .....	57
Tawil, M.: Einbindung von künstlichen neuronalen Netzen in einem wissensbasierten Konzept für die Feinblechkonstruktion .....	63
Düsing, C.: Produktentwicklung auf der Basis von Systems Engineering .....	67
Müller, N.: Informations- und Kommunikationstechniken als Hilfsmittel für die Normung .....	71
Müller, D.: demanda II - A prototype for Requirement Capture & Formalisation .....	79
 <b>Experimentelle Methoden und messtechnische Untersuchungen</b>	
Mupende, I.; Otto, St.: Der Einfluss des Rillungssystems auf die Bordscheibenbelastung .....	83
Käferstein, B.: 3D Graphik in der Messdatenerfassung .....	89

**Maschinenakustik**

Backhaus, S.:	
Lärmarm konstruieren XVIII - Systematische Zusammenstellung	
maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele .....	91
Käferstein, B.:	
Welches Fügeverfahren hat die besten Dämpfungseigenschaften ? .....	95
Backhaus, S.; Käferstein, B.:	
Lärminderung an einer Prägeeinheit.....	99

**Institutsbetrieb**

Trenke, D.:	
Informationsveranstaltung: „Rapid Prototyping und Rapid Tooling am IMW“ .....	103
Trenke, D.:	
Neues Praktikum: „Rapid Prototyping und Rapid Tooling“ .....	105
Birkholz, H.; Düsing, C.:	
Ausstellung auf der Hannovermesse Industrie im April 2001.....	107
Birkholz, H.:	
Erfahrungen zum neuen Maschinenlaborversuch Welle-Nabe-Verbindungen .....	109
Wächter, M.:	
Modularisiertes internationales Ingenieurstudium .....	111
Müller, D.; Niklaus, J.:	
Client-Management und Softwareverteilung im Netzwerk mit NetInstall .....	115

**Hochschule und Kontakte**

Düsing, C.:	
Ausbau der Asienkooperationen des IMW.....	119
Wolny, S.; Siemienieć, A.:	
Das Problem der Sicherheitsfaktoren ausgewählter Elemente einer Förderanlage im Bergbau.....	121

**Ausstattung etc.**

Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes.....	127
Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.1997.....	131
Autoren .....	135



# Welle-Nabe-Verbindungen mit besonderen geometrischen Rahmenbedingungen

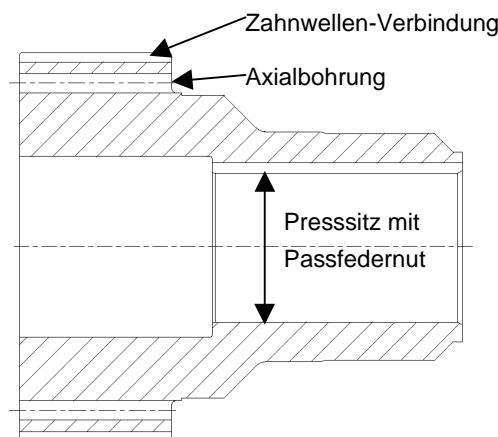
Schäfer, G.

*Die Berechnung von Welle-Nabe-Verbindungen ist stark standardisiert. Trotzdem steht der Konstrukteur häufig vor der Aufgabe Berechnungen für geometrische Sonderfälle durchzuführen oder Tragfähigkeitsoptimierungen auszuarbeiten. Der Artikel möchte dazu einige Ansätze kurz vorstellen.*

*Calculation and optimization of haft-hub-connections behind the lines of common standards is a ordinary task for the designer. Especially the geometrical features often didn't match the standard. The designer is in charge of the proper construction in consideration of the product engineering potentialities.*

## 1 Einleitung

Die Aufgabe Wellen und Naben miteinander zu Verbinden ist eine zentrale stark standardisierte Aufgabe des Konstrukteurs in der Antriebstechnik. Die beiden klassischen Alternativen der form- oder reibschlüssigen Verbindung sind in vielen Fällen nach dem Stand der Technik auslegbar. Dennoch sind nicht selten konstruktive Randbedingungen vorhanden, die eine spezielle Einzelfallbetrachtung notwendig machen. Dies können z.B. extrem dünnwandige oder lange Naben, Naben mit gestuften Aussendurchmessern, Wellen/Naben mit radialen oder axialen Bohrungen oder Bauteile, die mit geringem Abstand eine Formschluß- und eine Reibschlußverbindung besitzen, und sich so beide schlußartspezifischen Nachteile überlagern können, sein.



**Bild 1.1:** Bauteil mit Form- und Reibschluss sowie weiteren geometrischen Rahmenbedingungen

Der Einfluß besonderer Werkstoffkombinationen auf das elastische Zusammenspiel der beiden Verbindungsteile wurde zwar auch schon am IMW untersucht soll aber jetzt hier nicht zusätzlich betrachtet werden. In den folgenden kurzen Absätzen sollen beispielhaft Lösungsmöglichkeiten und die dabei verfolgten Ideen skizziert werden. Weitere Aufsätze in dieser Mitteilung zu Längsstift-, Zahnwellen- und IHF-Verbindungen behandeln diese Thematik nochmals im Einzelnen.

## 2 Zahnwellen

Zur Übertragung von Drehmomenten bei gleichzeitiger axialer Verschiebbarkeit von Welle und Nabe werden häufig Zahnwellen-Verbindungen mit Profilen nach DIN 5480 eingesetzt. Die große Anzahl im Eingriff befindlicher Formelemente (Zahnpaare) ermöglicht die Übertragung hoher Drehmomente bei geringen Nabenaußendurchmessern. Kostengünstige Anwendungen erschließen sich insbesondere bei Herstellung großer Stückzahlen mittels spanender und vor allem spanloser Herstellungsverfahren.

Bisherige – z.T. stark vereinfachte – Berechnungsansätze für Mitnehmerverzahnungen wie die Berechnung auf Basis einer zulässigen Flankenpressung [1] berücksichtigen das elastische Zusammenspiel von Welle und Nabe auf dem Lastleitungsweg nicht. Besondere Effekte der Lasteinleitung in solchen Verbindungen werden meist noch hinter die Betrachtung der ungleichmässigen Lastverteilung über der Länge und dem Umfang dieser formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindung gestellt. Charakteristisch für die Lastverteilung ist das komplexe Passungssystem der Zahnwellen-Verbindungen.

Alle diese Effekte treten schon bei Naben mit einfachen zylindrischen Aussendurchmessern auf. Wieviel komplexer sich die Beanspruchungssituation bei einem Bauteil mit kombiniert form- und reibschlüssigen Verbindungen und einer Geometrie wie in **Bild 1.1** darstellt, ist leicht vorstellbar.

Ein einfaches weiteres Praxisbeispiel sei die in **Bild 2.1** dargestellte gestufte Zahnnahe. Aus der deutli-

chen Durchmesserstufung ergibt sich eine unterschiedliche Torsionssteifigkeit in den beiden Abschnitten, die auf die Lastspitze am Verbindungsbeginn einen reduzierenden Einfluss hat.



**Bild 2.1:** Gestufte Nabe mit Verzahnung nach DIN 5480

Im Zusammenhang mit gestiegenen Leistungs- und Sicherheitsanforderungen ist ein verbesserter Berechnungsansatz zur sicheren Auslegung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen erforderlich. Die Untersuchung des Betriebs- und Beanspruchungsverhalten von Zahnwellen-Verbindungen ist ein Forschungsschwerpunkt am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal. Aus den Ergebnissen umfangreicher numerischer und experimenteller Untersuchungen, die von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., der Deutschen Forschungsgemeinschaft und der Volkswagenstiftung gefördert werden, ist ein neuer Ansatz zur Berechnung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen entwickelt worden [2,3]. Dieser Berechnungsansatz war die Grundlage für die Überarbeitung der Norm DIN 5466.

Die Dimensionierung von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen erfolgt nach DIN 5466 auf zwei prinzipiell verschiedene Ausfallursachen: Verschleiß und Gewalt- oder Dauerbruch. Das verschleißbedingte Abtragen von Zahnflankenbereichen führt zu einer Spiel- und Exzentrizitätsvergrößerung und damit zum 'Aufbrauchen' der Formschlußelemente. Durch die geometriebedingten Kerben entstehen Spannungsüberhöhungen, die bei statischer Last zum Gewaltbruch und bei dynamischer Beanspruchung zum Dauerbruch der Verbindung führen.

Die Analyse vieler Zahnwellenbrüche führte zu folgenden Ergebnissen:

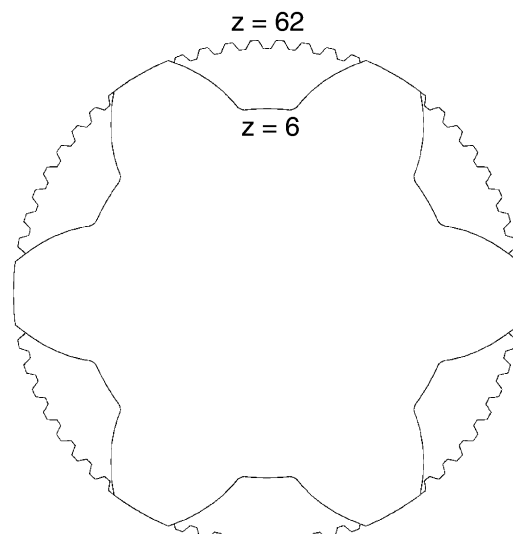
- Bei Gewalt- und Dauerbrüchen beginnen die Anrisse meist in der Kerbe im Zahnfuß direkt am Verbindungsrand oder an einem Ort in unmittelbarer Nähe des Verbindungsrandes innerhalb der Verbindung.

- Das Verformungsverhalten der Verbindung und insbesondere der Steifigkeitssprung an den Verbindungsändern bewirken eine ungleichförmige Beanspruchungsverteilung über der Verbindungslänge mit einer Lastüberhöhung am Verbindungsanfang [3]. Weitere Belastungsspitzen entstehen durch verzahnungsgeometrisch bedingte Kerbwirkungen am Zahnfuß von Welle und Nabe. An der Lasteinleitungsstelle resultiert aus der Überlagerung der einzelnen Spannungsmaxima ein komplizierter dreiachsiger Spannungszustand, der den Dauerbruch fördern kann [4], kritisch ist in diesem Fall der Verzahnungsauslauf. Abhängig von dessen geometrischer Gestaltung und Herstellverfahren sind hier Unterschiede im Formfaktor von ca. 2 zu erwarten. Erste Ansätze zur numerischen Quantifizierung sind im nachfolgenden Artikel unseres Gastwissenschaftlers Herrn Hua dargestellt.

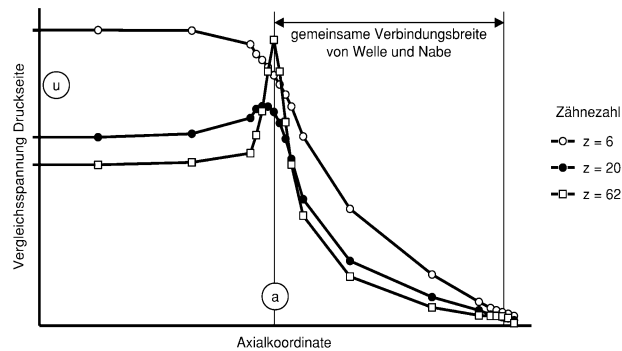
## 2.1 Beanspruchungsverhalten von Zahnwellen-Verbindungen

Zur Klärung des Spannungs- und Verformungsverhaltens von Zahnwellen-Verbindungen unter Drehmomentbelastung wurden umfangreiche dreidimensionale Finite-Elemente-Kontaktrechnungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Form von Geometrie Kennzahlen in die Überarbeitung der Berechnungsvorschriften nach DIN 5466 eingeflossen.

In **Bild 2.2** sind beispielhaft zwei Zahnwellen-Verbindungen mit gleichem Kopfkreis mit kleiner ( $z=6$ ) und großer ( $z=62$ ) Zähnezahl dargestellt.



**Bild 2.2:** Zähnezahlvergleich



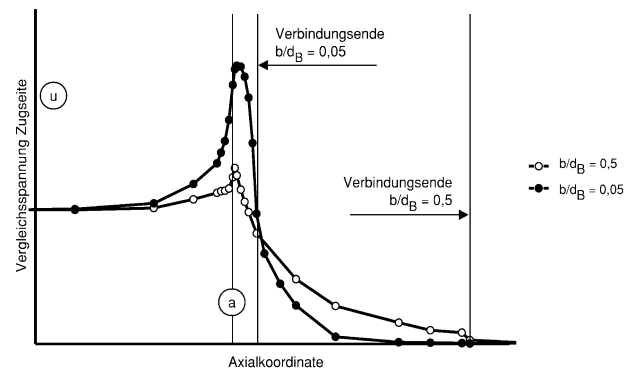
**Bild 2.3:** Zahnfußspannung über Verbindungsbreite

Der Verlauf der Vergleichsspannung über der Verbindungsweite für Druck- und Zugseite der Welle ist für diese zwei sowie für eine weitere Verbindung mit Zähnezahl  $z=20$  in **Bild 2.3** aufgetragen. Die Verbindung mit Zähnezahl  $z=6$  zeigt kein ausgeprägtes Spannungsmaximum am Verbindungsbeginn (a). Die maximale Vergleichsspannung befindet sich im Bereich vor der Kontaktzone, in dem der Einfluß der Zahnbiegung abgeklungen ist und der Zustand ungestörter Torsion (u) vorliegt [3]. Mit zunehmender Zähnezahl wird ein ausgeprägtes Spannungsmaximum am Verbindungsbeginn erkennbar. Die Ursache ist im Verlauf des Kraftflusses zu sehen, der von der Nabe über die Kontaktzone in die Welle verläuft.

Bei gleicher Drehmomentbelastung weisen Zahnwellen mit geringer Zähnezahl eine höhere Beanspruchung im Bereich ungestörter Torsion (u) auf als Verbindungen mit großer Zähnezahl. Der Grund dafür liegt in den unterschiedlichen Widerstandsmomenten der Zahnwellen aufgrund unterschiedlicher Kernquerschnittsflächen begründet, wie die Gegenüberstellung von Zahnwellen-Verbindungen mit stark unterschiedlichen Zähnezahlen in Bild 2.2 leicht erkennen läßt.

In verschiedenen Untersuchungen wurde gezeigt, daß sich mit Verwendung größerer Verbindungsweiten als  $b=0,5 \cdot d_B$  die maximalen Zahnfußspannungen nur noch unwesentlich reduzieren lassen [3]. In Bezug auf die Wellenzahnfußbeanspruchung liegt bei Drehmomentbelastung das optimale Verhältnis Verbindungsweite zu Bezugsdurchmesser bei  $b/d_B=0,6$ . Nach Kenntnisstand des Verfassers werden in vielen Anwendungsfällen deutlich zu lange Verbindungen  $b/d_B > 1$  gefertigt. Für die Ausnutzung der Verbindungsweite kann die von Herrn Huber vorgeschlagene Flankenlinienkorrektur genutzt werden, die sich an der elastischen Verdrehlinie des Torsionsstabes orientiert. Durch diese geometrische Korrektur wird eine gleichmäßigere

Lastverteilung über der Verbindungsweite erreichbar. Eine andere extreme Verzahnungsgeometrie, die in großer Stückzahl produziert wird ist die Innenverzahnung von Kupplungslamellen u.ä.. Die Lastverteilung über der Verbindungsweite ist in diesem Fall gemäß **Bild 2.4** deutlich günstiger. Für die Welle bleibt aber das Problem der extremen Spannungskonzentration am Verbindungsanfang erhalten. Hier sind spezielle Maßnahmen am Verzahnungsauslauf der Wellenverzahnung notwendig. Die Vergleichsspannung im Zahnfuß der Welle ist für eine Verbindung mit mittlerer Zähnezahl und Verbindungsweiten von  $b/d_B = 0,05$  und  $0,5$  in Bild 2.4 dargestellt.

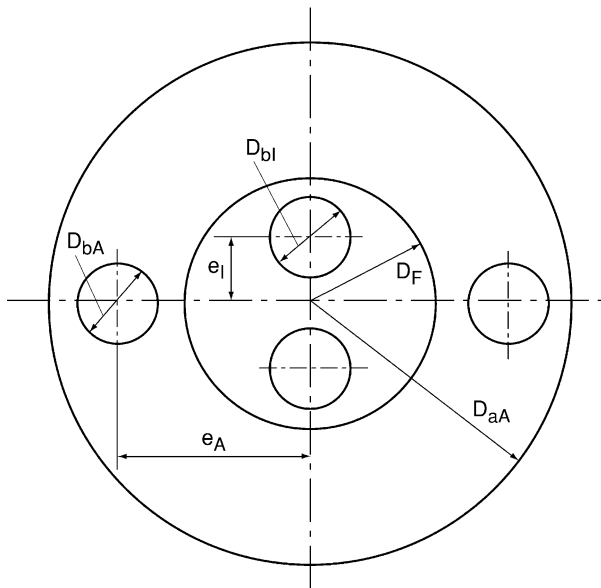


**Bild 2.4:** Vergleich der Zahnfußspannung in der Welle über der Verbindungsweite für verschiedene Breite/Bezugsdurchmesserverhältnisse  $b/d_B$  [3]

### 3 Pressverbindungen

Die zweite große Gruppe der Welle-Nabe-Verbindungen sind die reibschlüssigen Verbindungen, zu denen auch die in einem der folgenden Artikel behandelten IHF-Verbindungen gehören. Ein weiteres Beispiel nach dem Prinzip des Reibschlusses ist der Schrumpverband der häufig durch konstruktiv bedingte Diskontinuitäten, wie Radialbohrungen (z.B. bei Pressölverbänden) oder exzentrische Axialbohrungen in Welle und Nabe (z.B. für Schmier- und Druckmittelzufuhr bei Kupplungen, Flanschbohrungen, Schraubenbefestigungen bei Spannringsverbindungen usw.), gestört ist. Diese Störungen bedingen einerseits eine örtliche Spannungszunahme und damit eine Begrenzung der übertragbaren Lasten infolge Kerbwirkung, andererseits verursachen diese Störungen eine Änderung des elastischen Verhaltens beim Schrumpverband - der effektive Paßfugendruck sinkt gegenüber einer rotationssymmetrischen Verbindung mit gleichem Übermaß [5]. Beispielhaft sei dies an einer Press-

verbindung mit exzentrischen Bohrungen in der Welle erläutert, **Bild 3.1**.



**Bild 3.1:** Geometrische Beziehungen an einer Pressverbindung mit axialen Schwächungen

### 3.1 Elastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen

Die in Kap.3 beschriebene Verminderung des Fugendrucks infolge der Schwächung von Welle oder Nabe führt einerseits zu einer Spannungsüberhöhung im Bereich der eingebrachten Schwächungen und andererseits zu einer Reduzierung des übertragbaren Drehmoments. Zur Ermittlung der Beanspruchungen und Übertragungseigenschaften im elastischen Bereich sind am IMW umfangreiche Untersuchungen durchgeführt worden, deren Ergebnisse in Kennzahlendiagrammen dargestellt sind [6]. Im Folgenden sollen die Ergebnisse an einigen charakteristischen Beispielen erläutert werden.

Zur Auslegung der geschwächten Verbindung auf Basis der bekannten Ansätze für rotationssymmetrischen Verbindung wird die maximale Spannung unter Einführung einer Formzahl  $\alpha_k$  berechnet. Für die Bestimmung der Übertragungsfähigkeit eines geschwächten Pressverbandes lässt sich die Übertragungsfähigkeitskennzahl  $\eta$  ableiten.

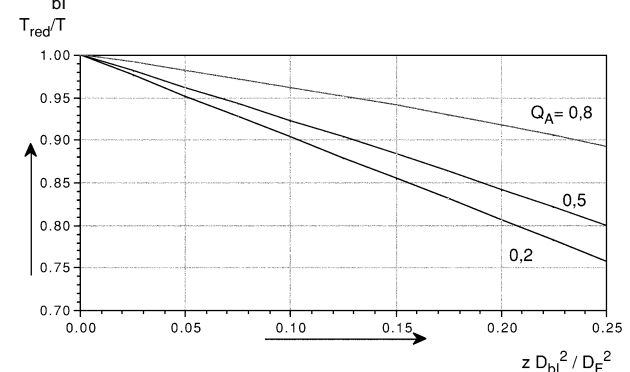
#### 3.1.1 Welle mit Axialbohrungen

##### a) ebene Probleme

Die maximalen Bohrungsrandspannungen für Wellen mit einer Axialbohrung liegen bei am zur Fugenfläche nächstliegenden Punkt des Bohrungsrandes (vgl. Bild 3.1). Bei Wellen mit mehreren Bohrung

wird die Formzahl  $\alpha_k$  wesentlich durch den Bohrungsabstand beeinflusst. Bei kleinen Bohrungsabständen liegen die maximalen Randspannungen am nächstliegenden Punkt zur Nachbarbohrung bzw. an den Verbindungslinien der Bohrungsmitten.

Zahlreiche Untersuchungen ergaben bei ingenieurmäßiger Vereinfachung, daß der durchschnittliche Fugendruck  $\bar{p}$  praktisch unabhängig von der Exzentrizität  $e_I$  und der Montagereibungszahl  $\mu_{\text{montage}}$  ist, er wird nur vom gesamten Bohrungsquerschnitt  $n\pi r_{bl}^2$  beeinflusst.



**Bild 3.2:** Übertragungsfähigkeit für Wellen mit Axialbohrungen

Die Anwendbarkeit findet dann eine Grenze, wenn die Restwandstärke einer Bohrung so klein ist, daß es zu plastischen Verformungen kommt.

##### b) räumliche Probleme

Zu den bisher bekannten Abhängigkeiten kommen bei den räumlichen Problemen noch die aus den axialen Spannungen und Geometrieänderungen herrührenden Einflüsse, die sich infolge der dreidimensionalen Spannungszustände mit Verformungsbehinderung kerbverschärfend auswirken.

Räumliche FEM-Untersuchungen ergaben, daß die Beanspruchungen am Bohrungsrand (Nabenstirnfläche) mit hinreichender Genauigkeit den Gleichungen des ebenen Ansatzes genügt, während die Spannungen des Bohrerkegels mit dem Bohrungsinnenrand nahezu unabhängig von der Bohrungstiefe und immer kleiner als an der Stirnfläche sind. Die Kerbwirkung aufgrund der Geometrie des Bohrerkegels bewirkt an der Spitze des Bohrerkegels ein sehr hohes Spannungsmaximum, das sehr schnell abklingt und keine Beziehung zu den übrigen geometrischen Beziehungen hat.

Bei der Beurteilung der Übertragungsfähigkeit ist im räumlichen Fall auch die Veränderung der Fugendruckverteilung über der Tiefe der Nabe zu berechnen. In einem ingenieurmässigen Ansatz kann man dabei unterscheiden zwischen einem ungestörten Be-

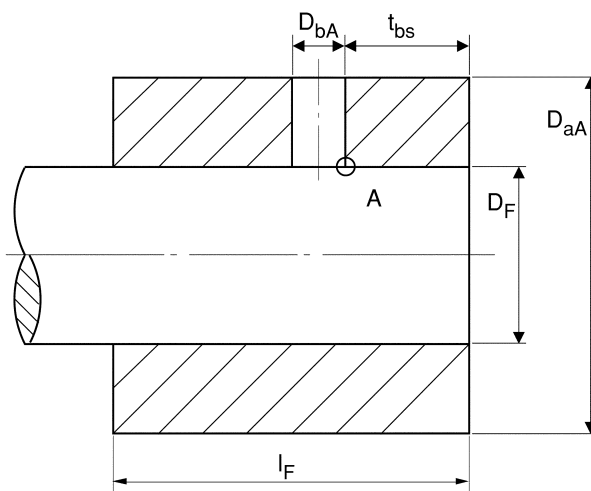
reich, der von den Bohrungen nicht erfaßt wird, und dem Bohrungsbereich. Die einfache Addition dieser beiden Bereiche führt zur Übertragungsfähigkeit der axial ungleichmässig geschwächten Pressverbindung.

### 3.1.2 Nabe mit Axialbohrungen

Die an den Wellen mit Axialbohrungen gezeigten Zusammenhänge der Beanspruchungs- und Pressfugendruckverteilung lassen sich von den physikalischen Zusammenhängen her auch auf Naben mit Axialbohrungen für ebene und räumliche Fragestellungen übertragen. Die maximalen Bohrungsrandspannungen der durch Axialbohrungen geschwächten Nabe liegen immer an dem zur Fügefläche nächstliegenden Punkt des Bohrungsrandes. Bei Vergrößerung des Bohrungsdurchmessers  $D_{bA}$  nimmt die Formzahl  $\alpha_k$  zu.

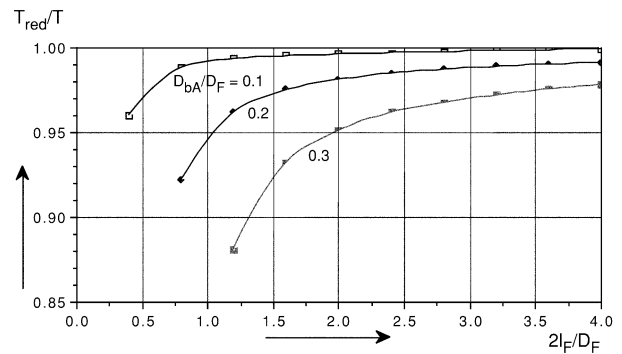
### 3.1.3 Nabe mit Radialbohrungen

Die maximalen Bohrungsrandspannungen liegen immer bei dem zur Stirnfläche am nächsten liegenden Punkt des Bohrungsrandes an der Fügefläche (Bild 3.3, Punkt A). Ebenso wie bei Naben und Wellen mit Axialbohrungen spielt die minimale Wandstärke  $t_{bs}$  die entscheidende Rolle. Bohrungen nahe der Stirnfläche verursachen starke Spannungserhöhungen am Bohrungsrand.



**Bild 3.3:** Geometrische Bezeichnungen an Naben mit Radialbohrungen

Bei der Übertragungsfähigkeit ist zu beachten, daß die auf der Fügefläche auftretenden Bohrungen „Leerstellen“ darstellen, die bei der Berechnung der Übertragungsfähigkeitskennzahl  $\eta$  durch den Fugenleergrad  $\lambda_F$  berücksichtigt werden müssen.



**Bild 3.4:** Übertragungsfähigkeit von Naben mit einer Radialbohrung

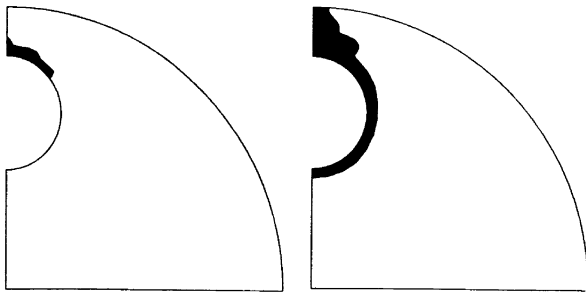
**Bild 3.4** zeigt die Übertragungsfähigkeit für Naben mit einer Radialbohrung. Die Untersuchungen führen auch hier zu der Erkenntnis, daß der durchschnittliche Fugendruck  $\bar{p}$  und das übertragbare Drehmoment  $T$  unabhängig von der Montagebedingung sind.

Erfolgt die Anwendung als Pressölverband, wird durch das zugeführte Pressöl eine Druckbelastung in der Radialbohrung hervorgerufen, die mit einer Aufweitung und einer ungünstigen Belastungswirkung auf die Nabe verbunden ist. Die entsprechende Festigkeitsberechnung muss daher den Belastungsfall der Nabe in gefügtem Zustand mit Öldruck in der Ölbohrung erfassen.

## 3.2 Teilplastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen

Zur Steigerung der Übertragungsfähigkeit werden in vielen Fällen teilplastische Verformungen an Maschinenelementen zugelassen, ohne daß durch das Überschreiten der Elastizitätsgrenze mit einem sofortigem Ausfall der Verbindung gerechnet werden muss.

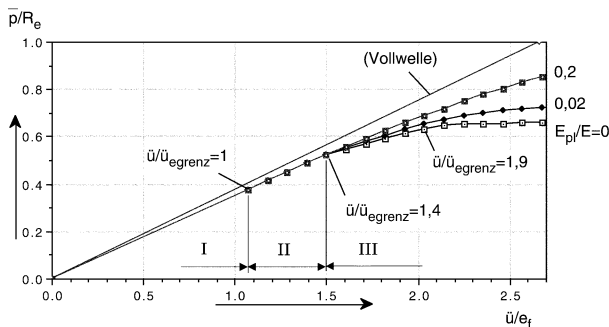
Da teilplastische Probleme nichtlinear sind, sind die in Kap.3.1 vorausgesetzten Bedingungen für eine dimensionslose Darstellung der Ergebnisse nicht mehr gegeben. Für die teilplastische Auslegung kann jedoch näherungsweise eine dimensionslose Darstellung erreicht werden, wenn bei ausreichender Stützwirkung der verbleibenden elastischen Gebiete die Verschiebungen und Verzerrungen der plastischen Zone die gleiche Größenordnung wie in der elastischen Zone aufweisen, die Untersuchungen beschränken sich daher auf kleine plastische Verformungen.



**Bild 3.5:** Plastische Zonen einer Welle mit zwei Axialbohrungen ohne Montagereibung;  $r_b/r_f=0,2$ ;  $e/r_f=0,625$ ;  $Q_N=r_f/r_a=0,5$

**Bild 3.5** zeigt am Beispiel einer durch Axialbohrungen geschwächten Welle ohne Montagereibung die plastischen Zonen bei zunehmendem Übermaß. Die vom Bohrungsrand mit der höchsten Spannung ausgehende plastische Zone nimmt mit steigendem Übermaß zu und erreicht schließlich im Grenzfall die Fügefläche. Bei mehreren Bohrungen können sich auch die plastischen Zonen treffen.

Für das in Bild 3.5 abgebildete Beispiel zeigt **Bild 3.6** den auf die Streckgrenze bezogenen durchschnittlichen Fugendruck  $\bar{p}$  in Abhängigkeit vom auf die elastische Grenzdehnung  $\varepsilon_f$  bezogenen Übermaß  $\bar{u}$ .



**Bild 3.6:** Fugendruck-Übermaß-Verhältnis einer Welle mit zwei Axialbohrungen ohne Montagereibung;  $r_b/r_f=0,2$ ;  $e/r_f=0,625$ ;  $Q_N=r_f/r_a=0,5$

Hieraus kann folgendes abgeleitet werden:

- Solange die maximale Bohrungsrandspannung  $\sigma_{vmax}$  kleiner als die Streckgrenze  $R_e$  ist, wird die Welle rein elastisch beansprucht (Bereich I, Bild 3.6).
- Mit  $\sigma_{vmax}$  wird die Welle teilplastisch beansprucht. Solange die dünnste Stelle der Bohrungswand zwischen Bohrung und Fügefläche oder zwischen Nachbarbohrungen nicht vollplastisch beansprucht ist, weicht der durchschnittliche Fugendruck  $\bar{p}$  nur „geringfügig“ von der Linearität zum Übermaß  $\bar{u}$  ab (Bereich II). Durch die Stützwirkung der verbleibenden elastischen

Zone behält die plastische Dehnung  $\varepsilon_{pl}$  am Bohrungsrand die gleiche Größenordnung wie die Dehnung an der Streckgrenze  $\varepsilon_f$ . Im Vergleich zur rein elastischen Auslegung kann sich die Übertragungsfähigkeit in diesem Beispiel mit zulässigen plastischen Verformungen um 40% vergrößern.

- Mit Erreichen der vollplastischen Durchverformung krümmen sich die Fugendruck-Übermaß-Linien stärker mit abnehmendem Verfestigungsersatzmodul  $E_{pl}$  (Bereich III).

Ingenieurmäßig von wichtiger Bedeutung ist der teilplastische Bereich zwischen der rein elastischen Grenzbelastung und dem merklichen Abweichen von der linearen Fugendruck-Übermaß-Linie (Bereich II). Durch die ausreichende Stützwirkung der elastischen Zone wird die Ausnutzung der geschwächten Pressverbindung bedeutend erhöht. Die Deformationen in den plastischen Zonen haben etwa die gleiche Größenordnung wie in den elastischen Gebieten; die Steifigkeiten bleiben fast unverändert im Vergleich zur rein elastisch beanspruchten Welle.

#### 4 Zusammenfassung

Die Vielfalt der konstruktiv notwendigen geometrischen Rahmenbedingungen macht über den gesamten Bereich der Welle/Nabe-Verbindungen gezielte Untersuchungen zur langfristigen Erweiterung standardisierter Berechnungsansätze notwendig.

#### 5 Literaturverzeichnis

- /1/ Decker, K.-H.: Maschinenelemente - Gestaltung und Berechnung. Carl Hanser Verlag, München 1990
- /2/ Schäfer, G.: Der Einfluß von Oberflächenbehandlungen auf das Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellen-Verbindungen mit Schiebeseitz. Dissertation TU Clausthal 1995
- /3/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation TU Clausthal 1996
- /4/ Dietz, P.; Schäfer, G.; Wesolowski, K.: Betriebsverhalten und Lebensdauer von Zahnwellen-Verbindungen. DVM-Tagung: "Maschinenelemente und Lebensdauer - Gestaltung und Optimierung", Dresden 1995, DVM-Bericht 121
- /5/ Dietz, P.; Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen. Antriebstechnik 35 (1996), Heft 4/5
- /6/ Tan, L.: Beanspruchungen und Übertragungsfähigkeit der geschwächten Welle-Nabe-Preßverbindungen im elastischen und teilplastischen Bereich. Diss. TU Clausthal, 1993

# Zur Simulation der Beanspruchung einer drehmomentbelasteten Zahnwellen-Verbindung mit Verzahnungsauslauf unter Verwendung des Finite-Elemente-Programmsystems ANSYS

Qingsong, H.

*Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellen-Verbindungen wird am IMW mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente u.a. mit dem Programmsystem ANSYS und MARC/MMENTAT analysiert. Um die Simulation von Zahnwellen-Verbindungen mit Verzahnungsauslauf zu ermöglichen, wurden dreidimensionale FE-Modelle entwickelt.*

*Bisher gibt es nur wenig Literatur über die Beanspruchungen von Zahnwellen-Verbindung mit Verzahnungsauslauf. Der Artikel beschreibt eine Methode zur Untersuchung von Zahnwellen-Verbindungen mit Zahnlückenauslauf mit dem Programmsystem ANSYS, dass am Zahnfuß oder beim Zahnlückenauslauf Spannungsspitzen auftreten können.*

## 1 Schadensfälle an Zahnwellen-Verbindungen

Die Übertragung von Drehmomenten macht eine Verbindung von Welle und Nabe erforderlich. Die Schadensfälle an Zahnwellen-Verbindungen können allgemein in zwei Kategorien unterteilt werden:

1. Flankenverschleiß: Verschleißvorgänge auf den Zahnflanken entstehen durch Relativbewegungen im Betrieb zwischen Welle und Nabe.

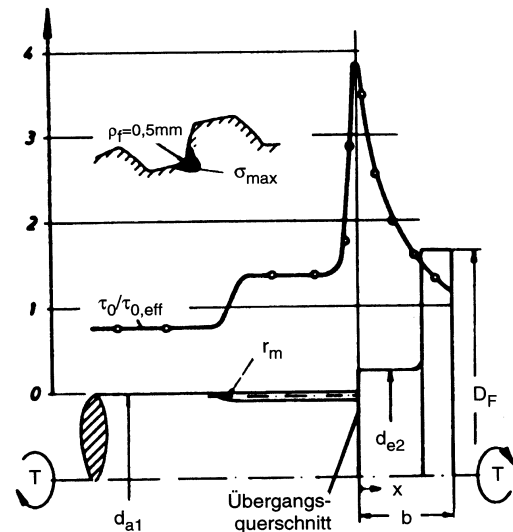
2. Versagen durch Bruch: Versagen durch Bruch ist meist eine Beanspruchungsüberhöhung im Zahnfuß, die in Abhängigkeit von der Verbindungsgeometrie und der Belastung zum Abscheren der Zähne, zum Bruch der Welle oder zum Platzen der Nabe führen kann. Die Ursache für den Bruch ist häufig in der Kerbwirkung der Verzahnungsgeometrie zu suchen. Es kann zwischen statischem Gewaltbruch und dynamischer Werkstoffermüdung unterschieden werden.

## 2 Stand der Forschung

In der Literatur liegen bisher nur wenige Untersuchungsergebnisse zur Ermittlung der Beanspruchungen im Zahnfuß der Welle oder Nabe einer drehmomentbelasteten Zahnwellen-Verbindung vor. Ein Teil der vorliegenden Forschungen befasst sich mit Detaillösungen für Spezialfälle, wie z.B. der reinen Wellentorsion oder ebenen Wellenzahnscheiben unter gleichmäßiger Flankenlast. Die tat-

sächliche Zahnfußbeanspruchung der drehmomentbelasteten Zahnwellen-Verbindung hängt entscheidend von der Lastverteilung auf den Zahnflanken und der Zusammensetzung der Teilbeanspruchungen aus der Flankenbelastung und der Torsion ab. Tatur /1/ untersuchte die Lastverteilung über der Verbindungsbreite einer Keilwellen-Verbindung.

Untersuchungen ergaben einen über der Verbindungsbereite charakteristischen Verlauf der Spannungsüberhöhung, die Schöpf /2/ als Kerbfaktor definierte. Die Spannungen erreichten immer am Übergang der Welle in die Welle-Nabe-Verbindung einen maximalen Wert und nahmen dann zum Ende der Verbindung hin stetig ab. Bezugsspannung war hierbei die aus der Wellentorsion resultierende Schubspannung, die am imaginären Wellendurchmesser ermittelt wurde, **Bild 1**.



**Bild 1:** Charakteristischer Spannungsverlauf im Zahnfuß in Abhängigkeit von der Axialen Koordinate  $x$  von Zahnwellen-Verbindungen

Untersuchungen der dreidimensionalen Beanspruchungszustände von Zahnscheiben wurden von Wesolowski /3/ und Garzke /5/ durch theoretische Rechnungen und FEM Simulationen bestätigt. Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweise drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen wurden ebenfalls von



Wesolowski /3/ und Garzke /5/ untersucht. Bei der Berechnung der maximalen Zahnfuß-Vergleichungsspannung muss zwischen dem Bereich der ungestörten Torsion und dem Bereich unmittelbar am Verbindungsanfang unterschieden werden.

Zahnfuß-Vergleichsspannung im ungestörten Bereich, reine Torsion:

$$\sigma_{v1,u} = \sqrt{3 \cdot \tau_{tmax1}^2} \quad (2.1)$$

Zahnfuß-Vergleichsspannung am Verbindungsanfang

$$\sigma_{v1,u,a} = \sqrt{(k_{s1,z} \cdot \sigma_{s1,z})^2 + 3 \cdot (k_{t1,z} \cdot \tau_{tmax1})^2} \quad (2.2)$$

Zugseite

$$\sigma_{v1,d,a} = \sqrt{(k_{s1,d} \cdot \sigma_{s1,d})^2 + 3 \cdot (k_{t1,d} \cdot \tau_{tmax1})^2} \quad (2.3)$$

Druckseite

$$\sigma_{v1} = \text{Maximum} \{ \sigma_{v1,u}, \sigma_{v1,z,a}, \sigma_{v1,d,a} \} \quad (2.4)$$

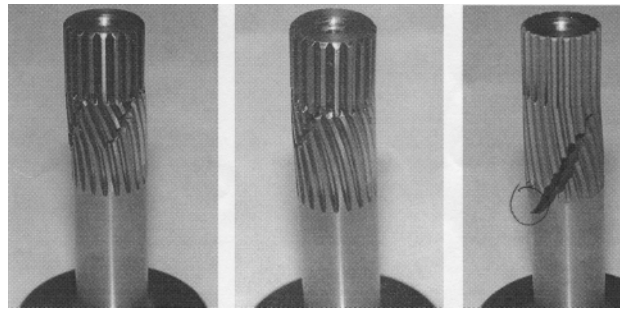
Maximale Zahnfuß-Vergleichsspannung der Welle Beim Projekt „Einfluss des Kugelstrahlens auf die Schwingfestigkeit von Zahnwellen-Verbindungen unter dynamischer Torsionsbelastung“ wurden die nachfolgend dargestellten Ergebnisse erarbeitet.

Für die Schwingversuche stehen 10 Wellen und Naben DIN 5480-27x1x1.25x20 zur Verfügung. Alle Bauteile sind aus dem Einsatzstahl 17 CrNiMo 6 (1.65879) gefertigt. Abgesehen von den makroskopisch sichtbaren Rissen konnten mittels eines Farbeindringverfahren keine weiteren Risse in allen 10 Wellen festgestellt werden, Beschädigungen der Naben waren nicht zu verzeichnen, **Tab. 1**.

ZWV-Nr.	Rißort	Bemerkung
1	Verzahnungsauslauf	Bild 2.1 (links und mittel)
2	Verzahnungsauslauf	
3	Verzahnungsauslauf	
4	Verzahnungsauslauf	
5	Verzahnungsauslauf	
6	Verzahnungsauslauf	Bild 2.1 (rechts)
7	Verzahnungsauslauf	
8	Verzahnungsauslauf	
9	Verzahnungsauslauf	
10	Verzahnungsauslauf	

**Tab. 1:** Auflistung der Versagensorten an den untersuchten Zahnwellen-Verbindungen

Das praktische Ergebnis zeigt die Möglichkeit, dass im Zahnlückenauslauf Spannungsspitzen auftreten, **Bild 2**.

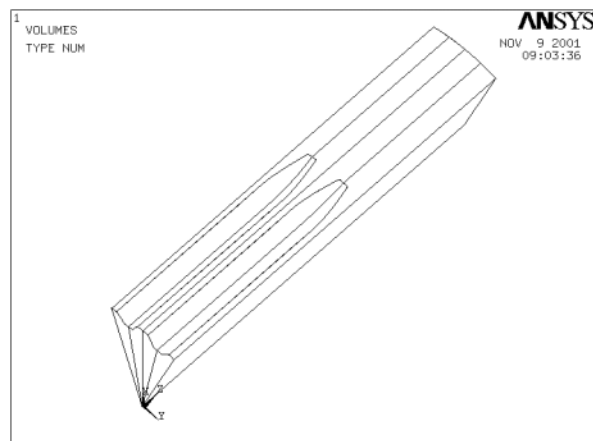


**Bild 2:** Versagensorte; links und mittel: Bruch der Verbindung am Verbindungsbeginn/Nabenbeginn; rechts: Bruch der Verbindung im Bereich ungestörter Torsion Verzahnungsauslauf

### 3 FEM-Modell zur Simulation der Beanspruchungen einer drehmomentbelasteten Verbindung nach DIN 5480

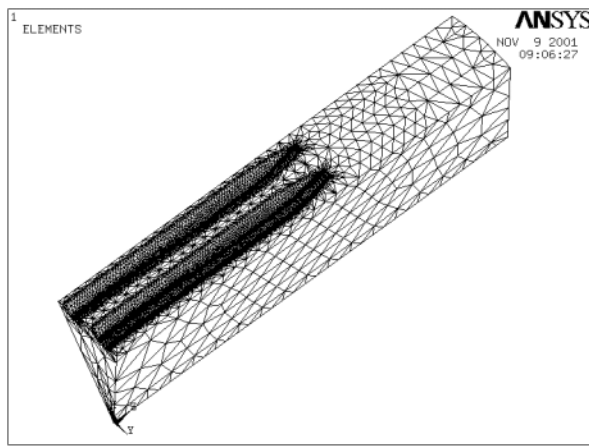
#### 3.1 Modellierung und Vernetzung

Für die drehmomentbelastete Zahnwellen-Verbindungen kann die Beanspruchung an räumlichen FEM Simulation ermittelt werden. Ein Zahnwellensektor mit zwei Zähnen nach DIN 5480-45x2x21 mit Zahnlückenauslauf wird Mit dem Programm ANSYS modelliert, **Bild 3**.

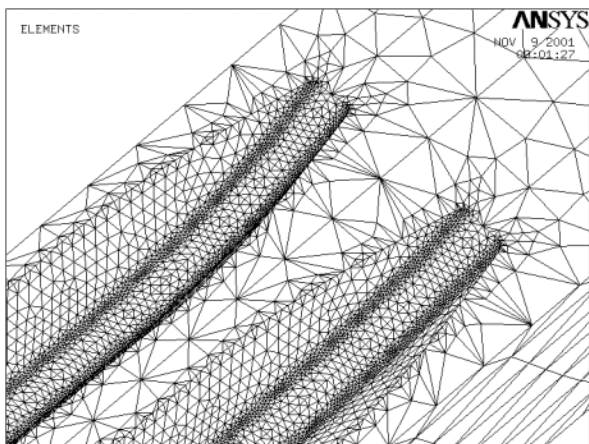


**Bild 3:** Dreidimensionales Modell des Zahnwellensektors mit Verzahnungsauslauf

Der Zahnwellensektor wurde mit dem Elementtyp Tet 92 vernetzt, **Bild 4**. Zahnfuß und Verzahnungsauslauf wurden dabei sehr fein vernetzt, **Bild 5**.



**Bild 4:** Die Vernetzung des Wellensektors mit dem Elementtyp Tet 92



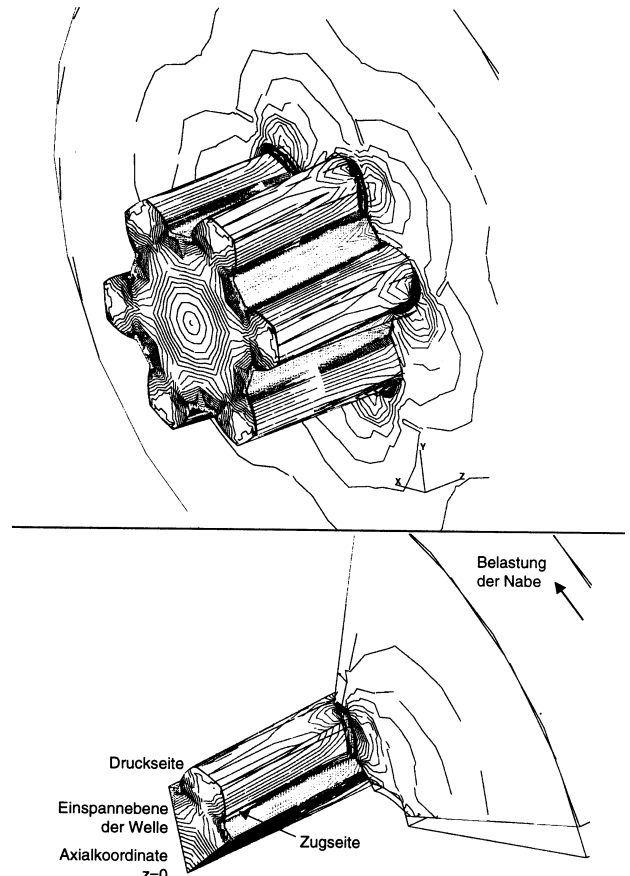
**Bild 5:** Vernetzung des Zahnlückenauslaufs und des Zahnfußes

### 3.2 Randbedingungen

In Anlehnung an die Simulationemethode von Wesolowski /4/ wurden auch hier folgende Randbedingungen angewendet.

- Der Öffnungswinkel des Wellesektors beträgt  $360^\circ/z$ . Die Sektorränder fallen mit den Symmetrielinien des Zahns oder der Zahnücke zusammen.
- Punktepaare auf den Sektorrändern mit der gleichen radialen und axialen Koordinate werden in allen Freiheitsgraden gekoppelt.
- Der Abgriff der Last erfolgt bei Welleneinspannung an der Einspannebene, auf der alle Punkte in radialer und tangentialer Richtung festgelegt werden. Die Sektorränder der Einspannebene werden zusätzlich in axialer Richtung festgelegt.
- Momenteinleitung durch Umfangslast.

Zur Überprüfung der angeführten Randbedingungen, entwickelte Wesolowski ein Sektormodell von Zahnwelle und Zahnnahe einer Zahnwellen-Verbindungen mit 6 Zähnen (Öffnungswinkel  $60^\circ$ ) und ein Kompletmodell abgebildet mit den gleichen äußeren Belastungen, **Bild 6**. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigte eine gute Übereinstimmung und bestätigt die Gültigkeit der Randbedingungen, s.d. die Verwendung eines Sektormodells auch für die Untersuchungen am Verzahnungsauslauf zulässig ist.



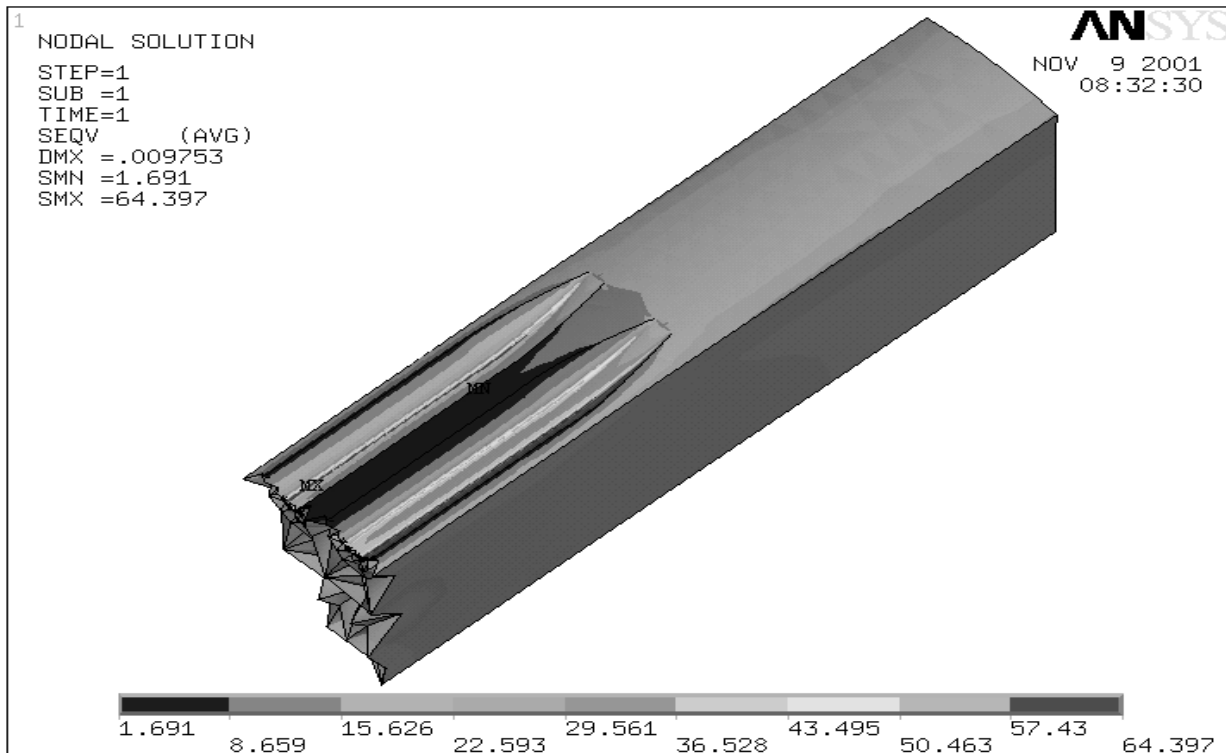
**Bild 6:** Vergleich des Spannungs- und Verformungsverhaltens eines vollständigen FEM-Modells und eines FEM-Sektormodells einer Zahnwellen-Verbindung DIN 5480 15X2X30X6

### 3.3 Berechnungsergebnisse

Das FEM Ergebnis bestätigt, dass im Bereich des Zahnlückenauslaufs und des Zahnfußes hohe Spannungsspitzen auftreten, **Bild 7**. Es wurden 5 verschiedene Schnittebenen betrachtet. und die Vergleichsspannungen am Zahnfuß und Zahnlückenauslauf verglichen, **Tab 2**.

Ab.	10	15	20	25	30
$\sigma$ (N/m <sup>2</sup> )	60.224	61.331	62.482	63.012	64.332

**Tab. 2:** Zahnfußvergleichsspannung in 5 Schnittebenen mit unterschiedlichem Abstand von der freien Seite des Wellensektors



**Bild 7:** Verlauf der Vergleichsspannung in der Zahnwellen-Verbindung im gesamten Sektor

#### 4 Zusammenfassung und weitere Untersuchungsaufgaben

Die in diesem Artikel angezeigten FE-Modelle bilden lediglich den Wellektor der gesamten Verbindung ab. Die Einleitung des Drehmomentes erfolgte dabei über Tangentialkräfte auf die Knoten der Zahnflanken. Das Berechnungsergebnis zeigt, dass es unter einer solchen Belastung zu größeren Vergleichsspannungen im Zahnfuß und dem Verzahnungsauslauf kommt als es mit den analytischen Berechnungsansätzen von Wesolowski und Garzke vorhergesagt werden kann. Für die folgenden Untersuchungen soll der Wellensektor mit dem Nabesektor kombiniert und mit Hilfe von Kontaktrechnungen analysiert werden. Als Lastfunktion werden dabei die von Schöpf /2/ angegebenen Verhältnisse angenommen.

#### Literatur

- /1/ Tatur, G.K. und Vygonnyi, A.G.: Irregularity of load distribution along a splined coupling, Russ. Eng. Jour. 49 (1969), Nr. 4, S. 23-27
- /2/ Schöpf, H.J.: Festigkeitsuntersuchungen an Zahnwellen-Verbindungen mit Spannungsoptik und Dauerschwingversuchen, Diss. TU München 1976
- /3/ Wesolowski: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweise drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung, Fortschrittberichte VDI Düsseldorf 1997
- /4/ Wesolowski: Ausnutzung von Symmetrieebenen zur Berechnung drehmomentbeanspruchter Bauteile, Mitteilungen aus dem IMW der TU Clausthal 1994
- /5/ Garzke: Einfluß des Kugelstrahlens auf die Schwingfestigkeit von Zahnwellen-Verbindungen unter dynamischer Torsionsbelastung, Clausthal 1999

# Analyse der aktuellen Zahnwellenverbindungsnormen DIN 5480 und ISO 4156

Dschiwischow, W.; Niklaus, J.

*Für Zahnwellen-Verbindungen existieren weltweit unterschiedlichste Normen, wie z.B. DIN 5480, ISO 4156, ANSI B92.1, JIS D 2001, NF E 22-144/145, BS 6186, die alle unterschiedliche Meßverfahren beinhalten. Im Zuge eines DFG Projekts wurden diese Normen im Einzelnen untersucht, wobei als Hauptziel die darin enthaltenen Toleranzwerte analysiert wurden.*

*World wide there are many different standards like DIN 5480, ISO 4156, ANSI B92.1, JIS D 2001, NF E 22-144/145, BS 6186 for the measurement of involute spline connections. The main target of the DFG Project is to analyse the tolerance-values of the different involute spline standards.*

## 1 Einleitung

Eine Möglichkeit zur Übertragung von Drehmomenten bietet die Zahnwellen-Verbindung. Bei diesem Verbindungstyp wird das Drehmoment von einem Bauteil zum anderen über die Zahnflanken der Zähne übertragen. Diese Zahnflanken haben überwiegend Evolventenprofil. Als Hauptforderungen an die Zahnwellen-Verbindungen ergeben sich dabei die sichere Übertragung des Drehmoments, sowie die Gewährleistung eines u.U. funktional erforderlichen Spiels.

Die Zahnwellen-Verbindungen welche zur Gruppe der formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen gehören, weisen ein deutlich komplizierteres Verbindungsprofil als z.B. Passfederverbindungen oder gar zylindrische Pressverbindungen auf /2/. Um die Hauptanforderung an die Zahnwellen-Verbindung, nämlich die sichere Übertragung des Drehmoments zu gewährleisten, müssen alle gleichzeitig im Kontakt stehenden Flanken der Außen- und Innenverzahnungen über ein entsprechendes Passungsverhalten verfügen. Hierbei spielt die Zahnwellenverbindungs-tolerierung eine wichtige Rolle und soll daher im Folgenden näher analysiert werden.

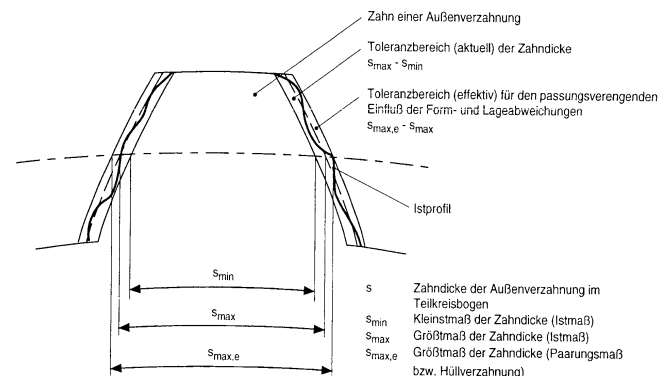
Aufgrund der Fülle von verschiedenen Zahnwellenverbindungs-normen, wurde für den Vergleich mit

der DIN 5480 /3/, die ISO 4156 /4/ ausgewählt, da sie große Übereinstimmungen mit den länderspezifischen Normen (speziell ANSI 92.2) enthält. Zur Gewährleistung des erforderlichen Flankenspiels, werden für die Paarung von Außen- und Innenverzahnung Abmaße vom spielfreien Zustand festgelegt. Dabei wird die Zahndicke der Außenverzahnung, bzw. die Lückenweite der Innenverzahnung toleriert.

Durch das maximal zulässige Flankenspiel und die erreichbaren Fertigungstoleranzen beim Verzahnen, wird das maximal zulässige Abmaß bestimmt. Ähnlich einer Rundpassung von Welle und Bohrung ergibt sich durch die Paarung einer Außenverzahnung mit einer Innenverzahnung ein Passungssitz nach ISO 286, jedoch aufgrund der Anzahl der Formelemente und ihrer starren Verknüpfung mit wesentlich komplizierterem Verhalten.

Eine Toleranz wird allgemein definiert als Differenz zwischen zulässigem Größt- und Kleinstmaß. Sie wird bestimmt durch Größe und Lage. Die Größe einer Toleranz wird von den sog. Grundtoleranzen bestimmt, die einerseits nach Nennmaßbereichen und andererseits nach Qualitäten (Kurzzeichen IT) gestuft sind (DIN 7151) /1/. Dies gilt auch für die hier zur Analyse anstehende DIN 5480 und eingeschränkt auch für die ISO 4156.

Bei Zahnwellen-Verbindungen ist das Paarungsmaß die Zahndicke bzw. Zahnücke einer formidealen Gegenverzahnung, mit der die zu prüfende Verzahnung gerade noch zu paaren ist, **Bild 1** /5/.



**Bild 1:** Toleranzproblematik an Zahnwellen

## 2 Ziele der Analyse

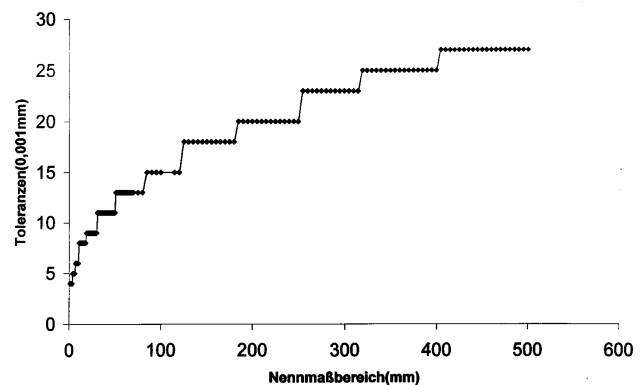
Die Analyse soll zeigen, ob die in den Normen existierenden Toleranzwerte auf der Basis funktionaler Anforderungen an Zahnwellen-Verbindungen stimmen oder überarbeitungswürdig sind. Für die optimale Erfüllung der Hauptfunktion „Drehmoment übertragen“ sollte die aufgebrachte Last gleichmäßig über dem Umfang und der Verbindungslänge auf alle Zähne verteilt werden. Dies bedeutet, daß bei der Aufbringung von Drehmoment, ein gleichmäßiger Kontakt zwischen den Zähnen der Außenverzahnung und der Innenverzahnung vorhanden sein sollte.

Wenn die Zahndicken bzw. die Zahnücken der einzelnen Zähne verschiedene Toleranzgrößen haben, dann treten bei der Aufbringung von Drehmoment vor allem in den Bereichen großer Zahndicken bzw. kleiner Zahnücken die ersten Kontakte auf. Die restlichen Zähne übertragen entweder weniger oder gar kein Drehmoment. Aus Toleranzberechnungsgrundlagen ergibt sich, daß zur Berechnung der Toleranzen von zueinander passenden Bauteilen, daß Nennmaß verwendet werden soll.

Als Konsequenz daraus ergibt sich, daß bei kleinem Nennmaß die dazugehörigen Toleranzen ebenfalls klein sein müssen, bzw. bei größerem Nennmaß die Toleranzen groß sein müssen. Dies hängt natürlich auch maßgeblich von den Qualitäten (IT) ab. Diesen Zusammenhang stellt das folgende Diagramm dar, **Bild 2**.

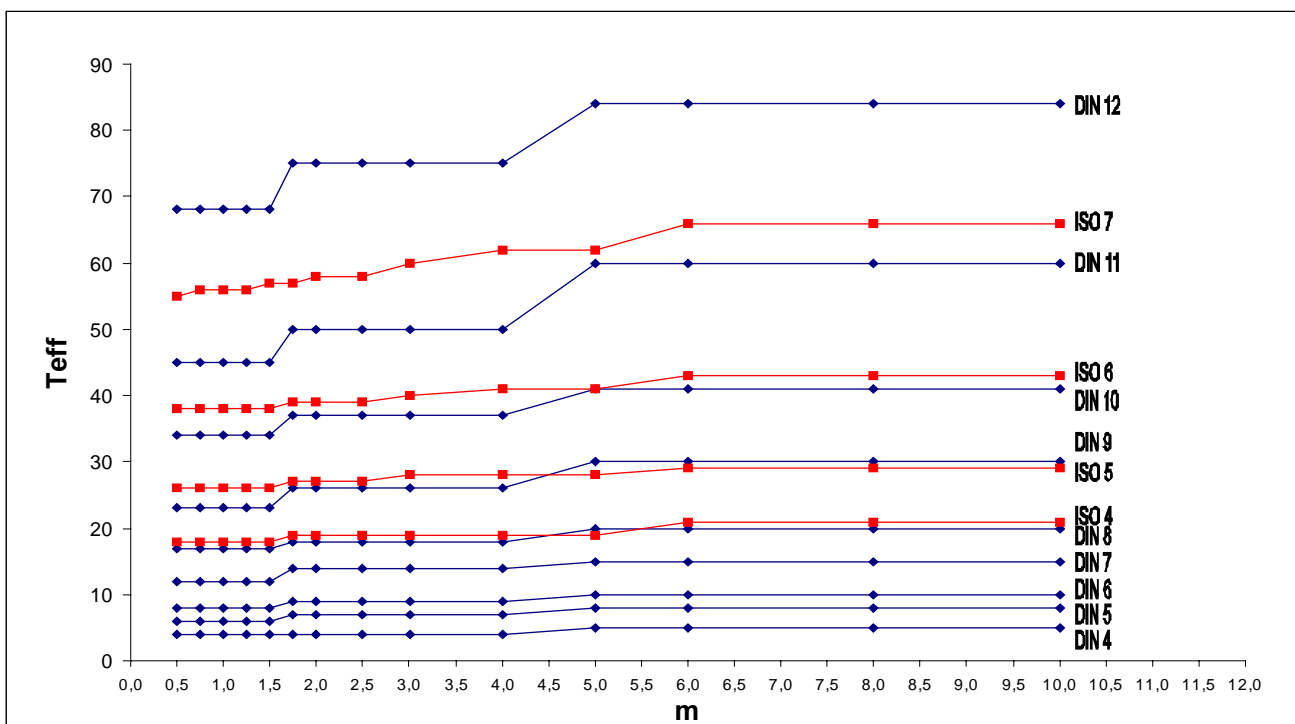
Bei Zahnwellen-Verbindungen bezieht sich das Nennmaß auf die Zahndicke, bzw. auf die Zahn-

ücke, jedoch nicht auf den Durchmesser als Produkt aus Zähnezahzahl und Modul. Die Zahndicke, bzw. Zahnücke im Teilkreisbogen wird im wesentlichen alleine durch den Modul ( $m$ ) definiert. Profilverschiebung und Eingriffswinkel haben nur einen geringen Einfluß. Das bedeutet, daß die Zahnwellen-Verbindung bei kleinem Modul dementsprechend kleine Zahndicken und bei großem Modul, große Zahndicken aufweist.

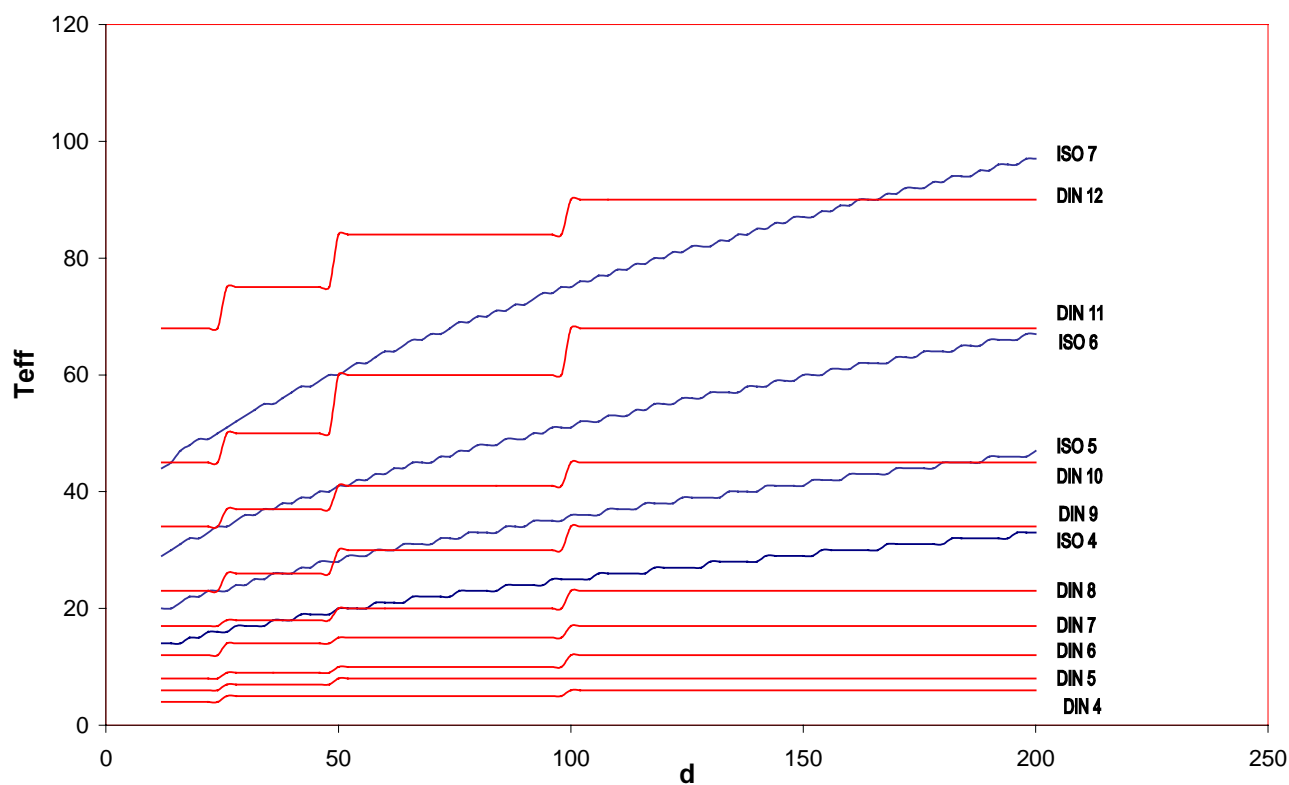


**Bild 2:** Abhängigkeit zwischen Nennmaßbereich und Toleranzen in ISO-Grundtoleranzen

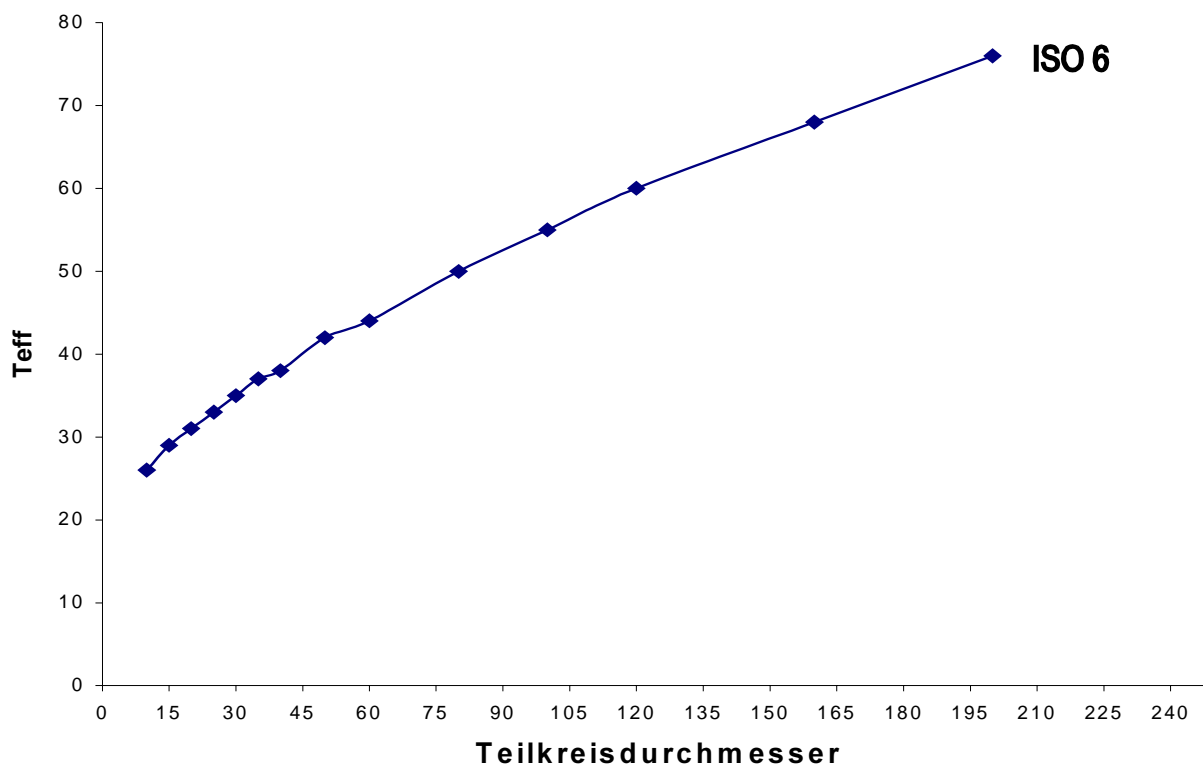
In den folgenden Diagrammen werden Abhängigkeiten zwischen Modul und Toleranz (effektiv), (Durchmesser konstant = 45mm), zwischen Durchmesser und Toleranz (effektiv) und zwischen Teilkreisdurchmesser und Toleranz (effektiv) (Zähnezahzahl konstant = 8) genauer analysiert, **Bild 3, 4** und **5**. Die überlagerten Einzelformabweichungen ergeben einen Betrag der effektiven Toleranz oder des effektiven Istbetrages.



**Bild 3:** Abhängigkeitsdiagramm zwischen Modul und Toleranz (effektiv), (Durchmesser 45mm)



**Bild 4:** Abhängigkeitsdiagramm zwischen Durchmesser und Toleranz (effektiv), ( $m = 2$ )

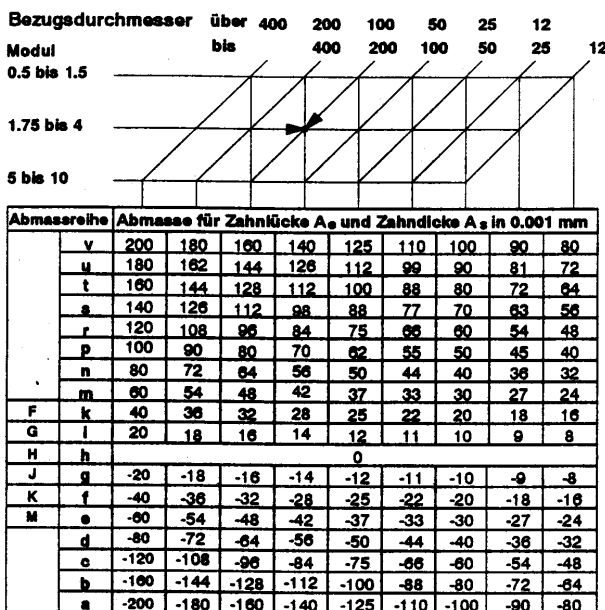


**Bild 5:** Abhängigkeitsdiagramm zwischen Teilkreisdurchmesser und Toleranz (effektiv), ( $z = \text{konstant}$ )

Im **Bild 3** wird unter Annahme eines konstanten Durchmessers, die Abhängigkeit zwischen Modul und Toleranz (effektiv) aufgezeigt. Wie in diesem Diagramm z.B. anhand der DIN4 Kurve deutlich zu erkennen ist, steigt die Toleranz trotz eines sich vergrößerndes Modul kaum an. Unter der vorher getroffenen Aussage, daß der Modul die Zahndicke bzw. die Zahnücke definiert, müßte beim Anstieg des Modul, die Toleranz auch entsprechend zunehmen.

Dagegen bewirkt eine Zunahme des Durchmessers der Zahnwellen-Verbindung einen deutlichen Anstieg der Toleranz, wie im **Bild 4** dargestellt. Der stärkere Anstieg bei den Toleranzklassen der ISO 4156 ist darin begründet, daß zur Berechnung der ISO-Gesamttoleranz, sowohl der Teilkreisdurchmesser als auch die Zahndicke herangezogen werden. Obwohl im **Bild 4** der Modul konstant bleibt, steigt die Toleranz erkennbar an.

Im **Bild 5** wird die Abhängigkeit zwischen Teilkreisdurchmesser und Toleranz (effektiv) für die Toleranzklasse 6 der ISO 4156 graphisch dargestellt. Da in diesem Diagramm die Zähnezahzahl konstant bleibt, muß bei der Zunahme des Teilkreisdurchmessers gleichzeitig auch der Modul zunehmen. Aus diesem Grund steigt wie zu erkennen ist die Toleranz deutlich an. Dieser Anstieg der Toleranz über den Teilkreisdurchmesser ist vergleichbar mit dem Kurvenverlauf des ISO-Grundtoleranzen/Nennmaßbereich-Diagramms (**Bild 2**).



**Bild 6:** Tabelle 7 für Abmaße und Toleranzen aus DIN 5480 – 1

Die Abhängigkeit der Toleranz vom Bezugsdurchmesser ist ebenfalls in der DIN 5480 – 1 in der Tabelle für Abmaße und Toleranzen beschrieben, **Bild 6**. Dort ist der Bezugsdurchmesser feiner unterteilt, nämlich in 7 Teilbereiche, als der Modul mit nur 3 Abmessungsbereichen. Dem Bezugsdurchmesser wird in der DIN 5480 eine größere Bedeutung zugewiesen, als dem Modul. Grund dafür sind die auf Wellen üblicherweise anzutreffenden weiteren Normteile, wie z.B. Kugellager mit ihren gestuften Durchmessern.

### 3 Zusammenfassung

Wie die Untersuchungen der Toleranzangaben innerhalb der Normen DIN 5480 und ISO 4156 gezeigt haben, beziehen sich die Toleranzangaben hauptsächlich auf den Durchmesser von Zahnwellen-Verbindungen ( $z \times m$ ) und nicht auf den Modul alleine. Normalerweise jedoch müßten die Toleranzangaben auf dem Modul alleine basieren, weil bei Zahnwellen-Verbindungen das Paarungsmaß die Zahndicke und Zahnücke ist. Die Zahndicke bzw. Zahnücke wird durch den Modul definiert, hierbei spielt auch die Profilverschiebung eine geringe Rolle. Für die sichere Drehmomentübertragung und das Flankenspiel muß man bei der Zahnwellentolerierung den Modul entweder als Basis nehmen, oder den Modul innerhalb der Berechnung stärker berücksichtigen.

Aus den zuvor genannten Gründen, sollte eine Überarbeitung der bestehenden Normen, im Hinblick auf eine stärkere Gewichtung des Moduls erfolgen.

### 4 Literatur

- 1/ Beitz, W.; Küttner, K.-H.: Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau. Springer Verlag, 18. Aufl., Berlin 1995
- 2/ Decker, K.-H.: Maschinenelemente – Gestaltung und Berechnung. Carl Hanser Verlag, 8. Aufl., München 1982
- 3/ DIN 5480: Zahnwellenverbindungen mit Evolventenflanken. Teil 1 – 16, Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin
- 4/ ISO 4156: Straight cylindrical involute splines – Metric module, side fit – Generalities, dimensions and inspection. International Standardisation Organisation (ISO), Genf
- 5/ Li, Z.; Schäfer, G.: Gedanken zur Toleranzfestlegung für Zahnwellen-Verbindungen. Institutsmitteilung Nr. 24, IMW Clausthal 1999



# Schalentheorie oder Ringtheorie?

## Ein Beitrag zur Dimensionierung des Trommelmantels

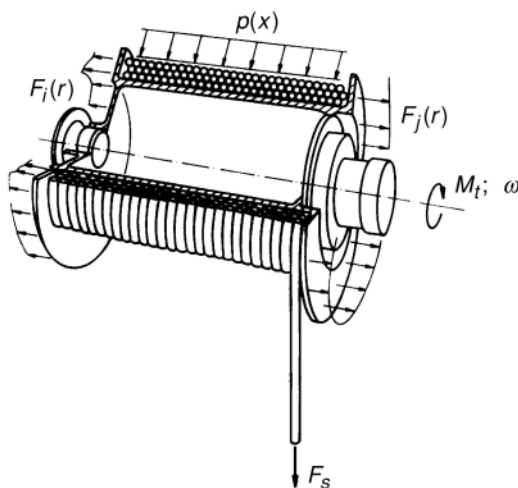
Mupende, I.

*Die Seiltrommel ist ein wichtiges Bauelement der Fördertechnik. Für ihre Auslegung gibt die Norm nur wenige Hinweise, s.d. in der Regel vereinfachte Theorien und das Erfahrungswissen des Konstrukteurs zur Anwendung kommen. Mit dieser Vorgehensweise werden nicht selten die Beanspruchungen in der Trommel unterschätzt, was zur Plastifizierung des Mantels oder zum kompletten Ausfall der Trommel während des Betriebs führen kann.*

*Literature and technical standard do not give enough details about the calculation from hoisting drum. In many cases the dimensioning is done according to the company experiences and with simplified theorie. This underestimate the real stress concentration and leads in many cases to plastification of the drum body or a total damage of the hoisting drum.*

### 1 Die Seiltrommel

Die Seiltrommel ist eines der Maschinenelemente, welches die Drehbewegung eines Antriebselementes in eine Längsbewegung mittels eines Seiles umwandelt. Im Unterschied zur Treibscheibenwinde, speichert die Seiltrommel gleichzeitig die gesamte Seillänge auf ihrem Mantel. Dies kann bei sehr großen Nutzlängen in mehreren Lagen erfolgen. Das seitliche Abrutschen des Seilpaketes wird durch die Bordscheiben verhindert.



**Bild 1:** Schnittdarstellung einer Seiltrommel

Im Vergleich zu andern mechanischen Systemen, wie Spindeln und Zahnstangen, welche auch die Rotationsbewegung in eine Linearbewegung umwandeln, ist die Seiltrommel sehr kompakt und kann eine sehr große Nutzlänge anbieten. Aufgrund dieses Vorteils ist sie in vielen Bereichen aber besonders in der Fördertechnik (z.B. im Kran, Aufzugsbau) weit verbreitet.

### 1.1 Auslegung des Seiles und der Seiltrommel

Basierend auf den Kundenanforderungen erfolgt die Seilauswahl und Auslegung nach Normvorschriften (DIN 15020, ISO 4308 - 4309, VDI 2358 und FEM Sektion I und IX) und mit Hilfe von Seilherstellerkatalogen. Diese bieten ausreichende Informationen, um ein für den Anwendungsfall geeignetes Seil auszuwählen.

Für die Auslegung der Trommel stehen dem Konstrukteur sehr wenige Informationen zu Verfügung – so beispielsweise das in DIN 15020, ISO 8087 empfohlene Verhältnis von Trommelgrunddurchmesser  $D_g$  zu Seildurchmesser  $d_s$ . Weitere Angaben, z.B. zur Dimensionierung der Mantelwandstärke  $h$  oder der Bordscheibendicke  $h_b$  insbesondere bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln, sind nicht verfügbar.

In der Praxis erfolgt die Auslegung der Trommel nach der Firmenphilosophie und den Erfahrungen der Konstrukteure. Die Seiltrommel wird in ihre Einzelkomponenten, d.h. Bordscheiben, Mantel, Kopplungsring und Stützscheiben zerlegt und jede Komponente wird einzeln mit vereinfachten mathematischen Ansätzen ausgelegt. In vielen Fällen werden jedoch nur die Hauptkomponenten, d.h. der Mantel nach der Ring- oder der Schalentheorie und die Bordscheiben nach der Biegebalken- oder der symmetrisch belasteten Plattentheorie berechnet.

### 2 Die Schalentheorie für die Seiltrommel

Die geometrische Gestalt des Trommelmantels genügt in der Regel den Kriterien für die Anwendung der Schalentheorie. Dies bedeutet, dass das Ver-

hältnis der Wanddicke  $h$  zum Mittelflächenradius  $a$  Werte kleiner als 0,2 aufweisen muss. Gängige Seiltrommelkonstruktionen im Bereich des Kranbaus besitzen ein Wanddicken/Radiusverhältnis zwischen  $0,05 \leq h/a \leq 0,15$ . Dieses verringert sich für Bergbautrommeln bis zu einem Wert von 0,01.

Fall	Verhältnis $h/a$
Gültigkeit der Schalentheorie	$h/a \leq 0,2$
Sehr dicke Schalen (Rohre)	$0,1 \leq h/a \leq 0,2$
Dicke Schalen	$0,04 \leq h/a < 0,1$
Sehr dünne Schalen	$h/a < 0,005$

**Tab. 1:** Einteilung der Kreiszylinderschalen

Schalen sind Flächentragwerke mit einfach oder doppelt gekrümmter Mittelfläche. Für ihre Berechnung werden zwei Theorien angewendet:

- die Membrantheorie und
- die Biegetheorie.

Bei der Membrantheorie wird ein ebener Spannungszustand vorausgesetzt. Die Spannungen wirken nur parallel zur Schalenmittelfläche. Eine sprunghafte Änderung der Geometrie (z.B. Ankopplung der Bord- und Stützscheiben bei Seiltrommeln), Behinderungen durch die Lagerung der Schale oder Kräftekonzentrationen senkrecht zur Schalenmittelfläche stören den Membranspannungszustand und führen zur Anwendung der Biegetheorie. Diese muss auch dann angewendet werden, wenn außer den tangential zur Mittelfläche der Schale wirkenden Längskräften zusätzlich Querkkräfte und Biegemomente sowie Drillmomente auftreten. Die Spannungen derartig beanspruchter Biegeschalen sind nicht gleichmäßig über der Schalendicke verteilt.

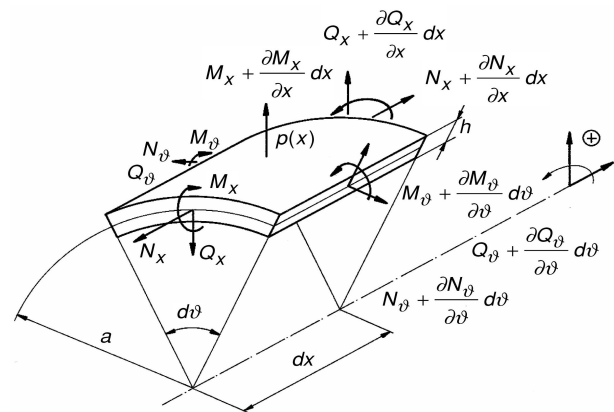
Für die Anwendung der Schalentheorie auf die Trommeldimensionierung gelten folgende Annahmen:

1. Der Druck auf den Trommelkörper wird als gleichmäßig verteilte Flächenbelastung  $p(x)$  über Umfang und Länge am Ende der Aufwicklung angenommen.
2. Das Material der Trommel muss den Grundbedingungen der Elastizität genügen, das heißt, es muss homogen und isotrop sein und seine Elastizität linear entsprechend dem Hooke'schen Gesetz ändern.

3. Alle Punkte, die vor der Verformung auf einer Normalen zur Mantelmittelfläche liegen, sollen sich auch nach der Verformung auf einer Normalen zur verformten Mittelfläche befinden. Damit wird die Schubverformung im Mantel vernachlässigt.
4. Die Verschiebung senkrecht zur Mantelfläche ist im Vergleich zur Manteldicke klein, ihre erste Ableitung ist sehr viel kleiner als eins. Dies erlaubt, im Rahmen der linearen Theorie, nur lineare Glieder zu berücksichtigen. Die Richtigkeit des Superpositionsprinzips wird durch diese Annahme gewährleistet.
5. Die relativen Abstände von Punkten innerhalb des Mantels werden nicht durch die Verformung verändert. Dies gilt insbesondere für den Abstand von Punkten zur Mittelfläche. Diese Annahme ist wichtig für die Aufstellung der Verzerrungs- und Verschiebungsbeziehungen und der Berechnung der Biegespannungen.
6. Die Manteldicke ist im Vergleich zu allen anderen Abmessungen klein. Die Spannungsverteilung wird linear über der Dicke angenommen.
7. Die zur Mittelfläche senkrecht wirkenden Normalspannungen sind vernachlässigbar.

## 2.1 Schalentheorie 1. Ordnung

Mit der Annahme von kleinen Verschiebungen in radialer Richtung können die Gleichgewichtsbedingungen des Schalenelementes im unverformten Zustand hergeleitet werden. Man spricht bei dieser Vorgehensweise von der Theorie 1. Ordnung. Hier wird der Einfluss der Formänderungen auf den Kräfteverlauf vernachlässigt.



**Bild 2:** Definition der Schnittkräfte am unverformten Schalenelement

Die allgemeine Lösung der Differentialgleichung des Gleichgewichtszustandes beschreibt die Verformung  $w(x)$  des Mantels. Ihr Verlauf ist abhängig von den Randbedingungen.

$$w(x) = C_1 \cosh \chi x \cos \chi x + C_2 \sinh \chi x \sin \chi x + C_3 \cosh \chi x \sin \chi x + C_4 \sinh \chi x \cos \chi x + \frac{1}{4\chi^4 K} \left( p(x) - \frac{\nu}{a} N_x \right)$$

mit:

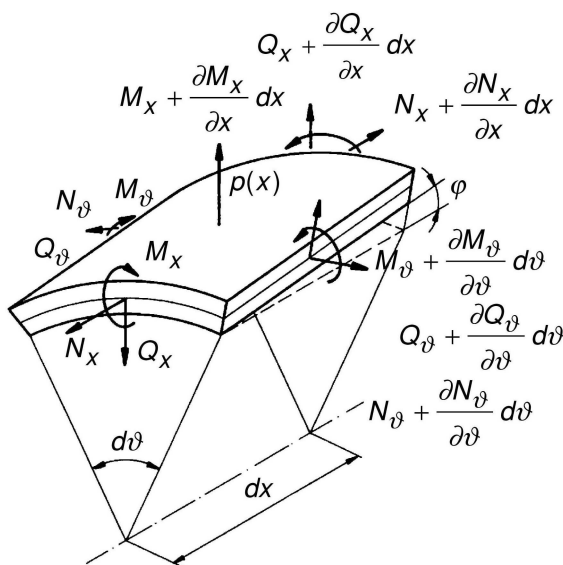
$\chi$  : Abklingkonstante oder Behälterkennzahl

$\nu$  : Querkontraktionszahl

$K$  : Biegesteifigkeit des Mantels

## 2.2 Schalentheorie 2. Ordnung

Die Theorie der 1. Ordnung setzt voraus, dass die radiale Verformung sehr gering im Vergleich zur Schalendicke ist. Diese Annahme trifft für das Verhalten dicker und sehr dicker Schalen mit elastischem Werkstoffverhalten besonders gut zu. Für dünne und sehr dünne Schalen oder bei plastischem Werkstoffverhalten ist diese Annahme nur bedingt zutreffend. Ist das Verformungsverhalten nicht eindeutig bekannt, sollte die Theorie der 2. Ordnung herangezogen werden. Die Theorie der 2. Ordnung betrachtet den Gleichgewichtszustand an einem verformten Schalenelement. Dabei wird die Neigung  $\varphi$  des Schalenelementes unter der äußeren Belastung berücksichtigt.



**Bild 3** Schnittkräfte am verformten Schalenelement

Aus dem Gleichgewichtszustand ergibt sich die Mantelverformung  $w(x)$  für  $N_x < 4\chi^2 K$ :

$$w(x) = C_1 \cosh \alpha x \cos \beta x + C_2 \sinh \alpha x \sin \beta x + C_3 \cosh \alpha x \sin \beta x + C_4 \sinh \alpha x \cos \beta x + \frac{1}{4\chi^4 K} \left( p(x) - \frac{\nu}{a} N_x \right)$$

mit:

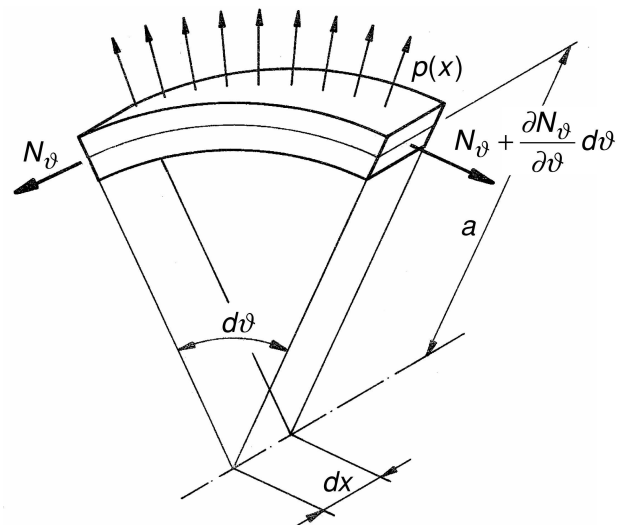
$$\alpha = \sqrt{\chi^2 - \frac{N_x}{4K}} \text{ und } \beta = \sqrt{\chi^2 + \frac{N_x}{4K}}$$

## 2.3 Mantel als Zusammensetzung von Ringelementen

Der Verlauf und die Höhe der Radialverformung des Mantels sind von den Randbedingungen abhängig, welche die Bestimmung der Konstante  $C_i$  ermöglichen. Für den Mantel sind vier Lagerungen möglich:

1. Freie Lagerung
2. Freier Rand
3. Elastischer Rand
4. Fest eingespannter Rand

Bei einem ungelagerten Mantel (freie Ränder) ergeben sich keine Biegebeanspruchungen unter dem äußeren konstanten Druck, wenn die Wandstärke als konstant vorausgesetzt wird. Der Mantel kann in diesem Fall als eine Zusammensetzung von mehreren Ringen unter Radialdruck betrachtet werden. Die Beanspruchungen ähneln denen eines Rings unter Radialdruck.



**Bild 4** Schnittkräfte eines ungelagerten Mantels

Im Mantel werden die Radialverformungen  $w(x) = w_0$  und die Tangentialspannung  $\sigma_\theta = \sigma_0$  als konstant über der gesamten Länge angenommen.

$$\sigma_0 = \sigma_\theta = \frac{p(x) \cdot a}{h}$$

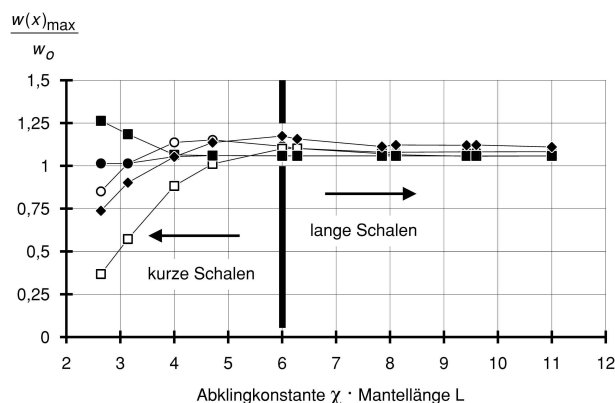
$$w_0 = w(x) = \frac{a^2}{E \cdot h} p(x)$$

### 3 Vergleich der 1. und der 2. Schalentheorie sowie der Ringtheorie

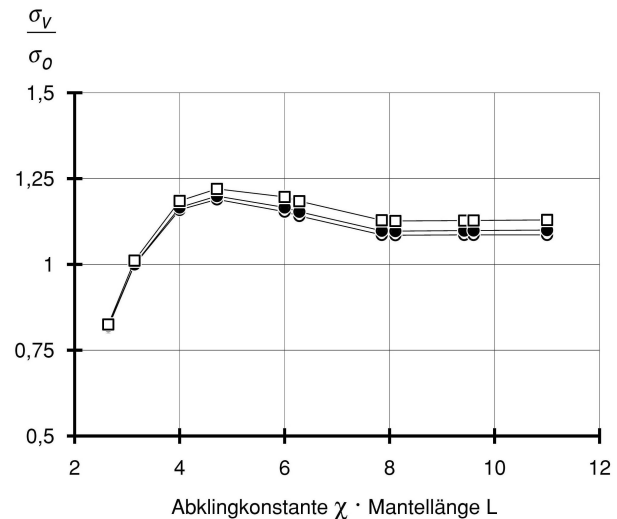
Vergleichsrechnungen mit der Theorie 1. Ordnung und 2. Ordnung zeigen für den Mantel der Seiltrommel nur sehr geringe Abweichungen untereinander:

- Für beide Theorien ist der Unterschied zwischen den Ergebnissen mit bzw. ohne Berücksichtigung der Axialkraft kleiner als 1%.
- Die Berechnungswerte beider Theorien sind identisch ohne Berücksichtigung der Axialkraft ( $N_x = 0$ ) und
- Mit Berücksichtigung der Axialkraft ( $N_x \neq 0$ ) beträgt der Unterschied zwischen beiden Theorien 0,002%.

Die Untersuchungen haben weiterhin gezeigt, dass die Analyse des Verformungsverhaltens des Trommelmantels mit der Schalentheorien stark von den Randbedingungen und der Schalenlänge abhängig ist. Die berechneten Beanspruchungen sind in jedem Fall größer als die mit der Ringtheorie, d.h. der ungelagerten Schale, ermittelten Werte.



**Bild 5** Verlauf der Verformungen des Mantels in Abhängigkeit von der Randbedingungen und der reduzierten Länge (Abklingkonstante  $\chi \cdot \text{Mantellänge } L$ )



**Bild 6** Vergleichsspannung im Trommelmantel bezogen auf die Spannung in einem Ring in Abhängigkeit von der Mantellänge und der Abklingkonstante

### 4 Zusammenfassung

Die Auslegung des Trommelmantels mit der Ringtheorie kann für Seiltrommeln mit einer kurzen reduzierten Länge ( $\chi \cdot L$ ) zu kritischen Ergebnissen führen. Die Unterschätzung der Beanspruchungen kann bis zu 25% betragen. Dies kann bei nicht ausreichenden Sicherheitsannahmen zur Plastifizierung oder zu unzulässig hohen Axial- und Radialverformungen des Mantels führen. Die Dimensionierung des Mantels mit der Schalentheorie ist die geeignete Vorgehensweise, um Seiltrommeln ohne sehr hohe Sicherheitsfaktoren auszulegen. Dabei genügt die Theorie der 1. Ordnung für die Mantelauslegung üblicher Seiltrommeln (Kran- und Aufzugsbereich). Die Axialkraft der Bordscheiben kann ohne große Fehler in der Beanspruchung des Mantels vernachlässigt werden.

### 5 Literatur

- /1/ Dietz, P: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation, TH Darmstadt, Darmstadt, 1971
- /2/ Mupende, I: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten. Dissertation, TU Clausthal, Cuvillier Verlag Göttingen, 2001

## Das „hydraulische Aufweiten“ im neuen Gewand - IHF sorgt für festen Presssitz -

Grünendick, T.

*Der Beitrag zeigt Verfahrensanwendungen aus dem Apparatebau und beschreibt sowohl die Fügetechnik als auch Ergebnisse analytischer Untersuchungen an dieser innovativen Welle-Nabe-Verbindung.*

*The contribution shows a process application from apparatus construction and describes the joint technology as well as the results of analytical investigations on these innovative shaft-hub connections.*

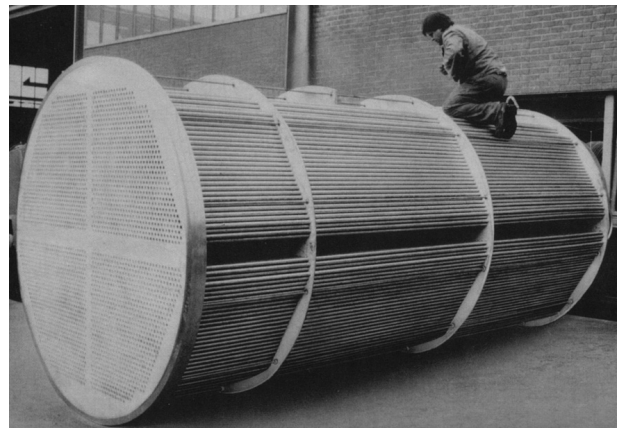
### 1 Einleitung

Das Innenhochdruckfügen (IHF) im Apparatebau bekannt unter dem Begriff des „hydraulischen Aufweitens“, ist eine Befestigungsmethode, um Rohre (Welle) mit Rohrscheiben (Nabe) zu verbinden. Die Verbindung zwischen Rohren und Rohrplatten ist im Apparatebau ein Fertigungsprozeß von großer sicherheitstechnischer und verfahrenstechnischer Bedeutung. Insbesondere für die Herstellung von Wärmetauschern (**Bild 1**) in konventionellen und kerntechnischen Kraftwerken wird diese Verbindungsart verwendet.

Die übliche Art der Rohr-/Rohrplattenverbindung war über Jahrzehnte hinweg das mechanische Einwalzen der Rohre, **Bild 2**. Beim Einwalzen entstehen jedoch hohe örtliche Spannungen und Verformungen, die durch den „harten“ Kontakt zwischen Rohr und Walzstein erzeugt werden. Dadurch kommt es zur Spannungsrißkorrosion, die die Verbindungsqualität mindert. Des weiteren gelang es nicht, die Verformung durch das Einwalzen so zu optimieren, dass einerseits der Endspalt zwischen Rohr und Rohrplatte vollständig verschlossen wird und andererseits das Rohr nicht abscherf. Dieser Spalt kann sich schnell zum Korrosionsnest entwickeln und die Verbindung zerstören.

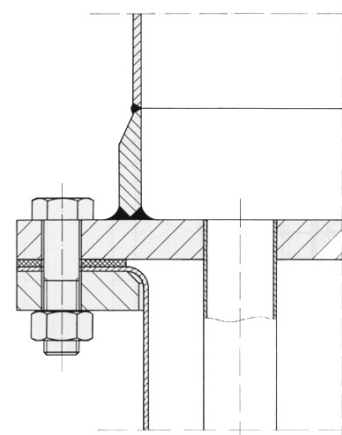
Mit dem hydraulischen Aufweiten konnten diese unerwünschten Eigenschaften und Nachteile aufgrund der hydraulischen Kräfte beseitigt werden. Die Restspannungen im Rohr sind wesentlich reduziert, was sich besonders bei spannungsrißkorrosionsempfindlichen Werkstoffen als Vorteil erweist.

Ebenso gelingt die Schließung des Spaltes zwischen dem Rohr und der Rohrplatte durch ein gleichmäßiges Ausbilden der Verbindung, speziell an den Randzonen. Hierfür ist im Wesentlichen die Platzierung der Sondendichtung im Rohr bzw. in der Welle verantwortlich.



**Bild 1:** Rohrbündel eines Wärmetauschers, /1/

Die Einführung der Aufweitesonde in das Rohr und das Auswechseln der Dichtungen nehmen zwar eine längere Zeit in Anspruch. Dagegen benötigt der Aufweiteprozess nur Bruchteile einer Sekunde. Damit wird das hydraulische Aufweiten gegenüber dem Einwalzen zu einem fertigungstechnisch schnelleren Verfahren.



**Bild 2:** Rohr-/Rohrplattenverbindung durch mechanisches Einwalzen, /1/

Mit der erfolgreichen Anwendung des hydraulischen Aufweitens im Apparatebau und seinen vielen Vorteilen, wie z.B. die hohe Qualität und gute

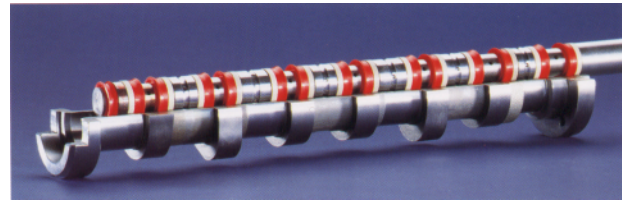
Reproduzierbarkeit der Verbindungen, ist ein Innovationstransfer auch auf andere Gebiete der Technik erfolgt. So wird seit wenigen Jahren dieses Verfahren zur Fertigung von Pressverbindungen verwendet, die vorrangig zur Herstellung gebauter Nockenwellen für Verbrennungsmotoren dienen.

Dieses fertigungstechnisch neu hergestellte Maschinenelement benötigt im Gegensatz zu den herkömmlichen Pressverbindungen, bei denen ein Übermaß der Fügepartner die spielfreie Übertragung hoher statischer und dynamischer Lasten gewährleistet, keine speziell abgestimmten Toleranzen. Damit sind die Geometrianforderungen der Kontaktflächen durch ein zulässiges Fügspiel deutlich geringer. Dies führt zu einer erheblichen Kosteneinsparung durch Verminderung des Fertigungsaufwandes und ermöglicht eine Verkürzung der Fertigungszeiten durch bessere Montage.

## 2 Prinzip des Innenhochdruckfügens

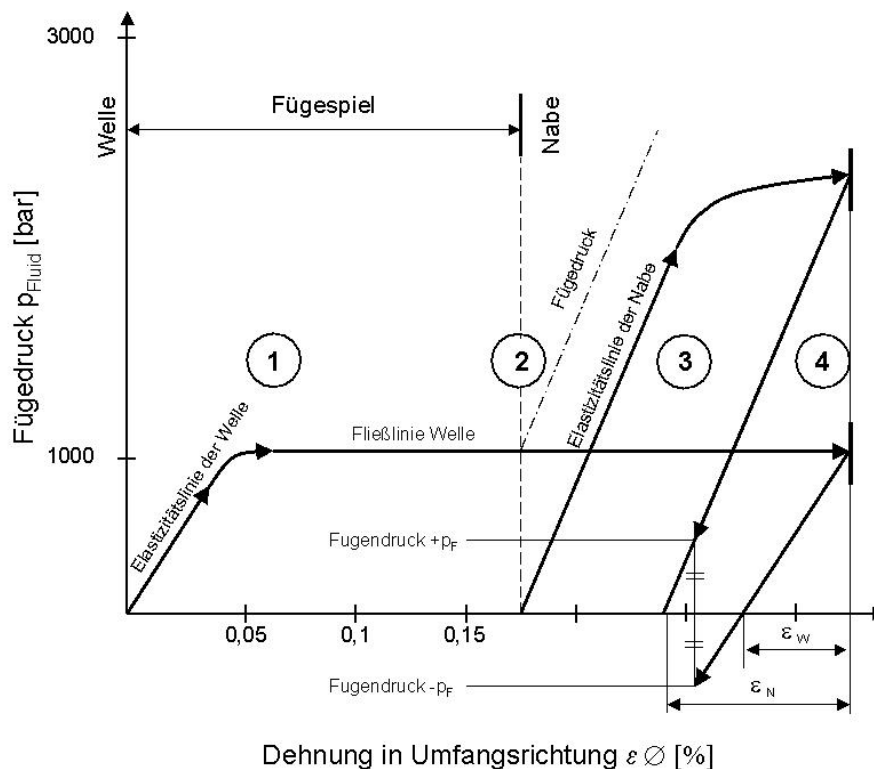
Das Prinzip des Innenhochdruckfügens ist erstaunlich einfach. Die Hohlwelle wird in der Nabe ausgerichtet. Das Aufweitewerkzeug (Sonde, **Bild 3**) wird in die Welle geführt und so positioniert, dass die auf der Sonde befindlichen Dichtungen exakt mit den Nabenrändern abschließen. Dieser im Rohr genau

abgedichtete Ringspalt unterhalb der Nabe und zwischen den Sondendichtungen wird anschließend durch ein Hydromedium mit Druck beaufschlagt, **Bild 5-b**. Dieses Medium gelangt durch eine Sondenbohrung in den Ringspalt.

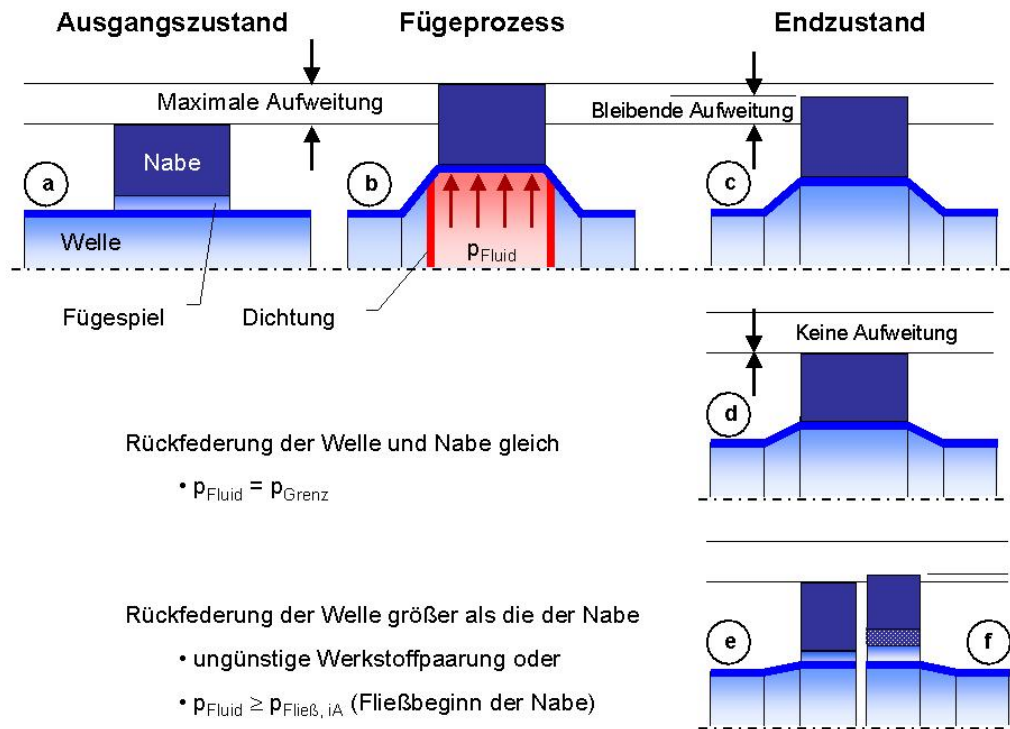


**Bild 3:** Sonde zum Fügen einer Nockenwelle, 1/2/

Bei Drucksteigerung weitet sich die Welle lokal unterhalb der Nabe elastisch und/oder plastisch auf, **Bild 4-1**. Nachdem das Fügspiel überwunden ist, legt sich die Welle an die Nabe an und beide Bauteile expandieren, **Bild 4-2**. Bei weiterer Drucksteigerung und durch die gezielte Materialkombination der beiden Fügepartner wird die Welle plastisch, die Nabe lediglich elastisch verformt, **Bild 4-3**. Nach dem Erreichen des max. Fügedrucks und Halten des Drucks für einen bestimmten Zeitraum erfolgt die vollständige Druckrücknahme. Welle und Nabe federn gemeinsam zurück, **Bild 4-4**. Durch die unterschiedlichen Nachgiebigkeiten und aufgrund der Streckgrenzenunterschiede der Füge-



**Bild 4:** Verformungsschaubild der Welle-Nabe-Verbindung während des Innenhochdruckfügens



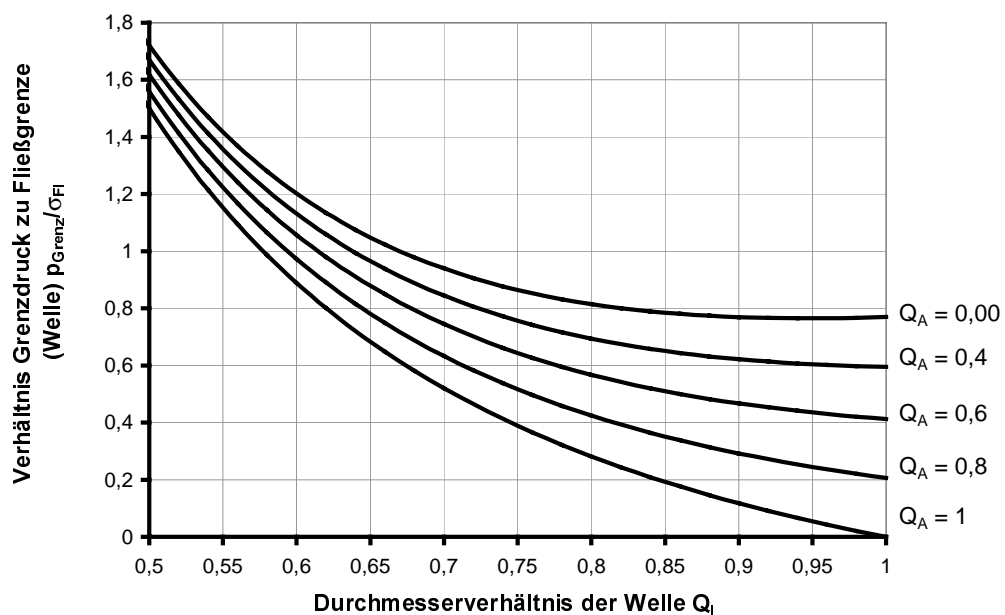
**Bild 5:** Phasen des Fügeprozesses und mögliche Endzustände

partner ergibt sich ein unterschiedliches Rückfederungspotential, das dazu führt, dass sich die Nabe auf die Welle „schrumpft“. Die Rückfederungsbehinderung, verursacht durch die plastifizierte Welle, sorgt für einen festen Presssitz der Welle-Nabe-Verbindung, **Bild 5-c**.

Wird eine ungünstige Materialpaarung gewählt, bei der das Rückfederungsverhalten der Nabe kleiner ist als das der Welle, kann sich ein Presssitz nicht

ausbilden, **Bild 5-e**. Auch ist der Presssitz möglicherweise nicht realisierbar, wenn der Fügedruck einen Grenzwert ( $p_{\text{Fließ, iA}}$ ) erreicht, der zum Plastifizieren der Nabe führt. Hier behindern die entstehenden Eigenspannungen ein vollständiges zurückspringen, so dass auch hier ein Fügespalt verbleibt, **Bild 5-f**.

Den Grenzzustand bei dem die Rückfederung der Nabe gleich der Rückfederung der Welle ist, wird in



**Bild 6:** Bezogener Grenzfügedruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie



**Bild 5-d** dargestellt. Hier liegt also ein Zustand vor, der mindestens erreicht werden muss, damit sich ein Presssitz bei Überschreitung des Grenzfügedruckes einstellt. Bei der analytischen Betrachtung der Verbindung ist dieser „Grenzzustand“ von besondere Bedeutung.

### 3 Analytische Betrachtungen zum Fügeprozess

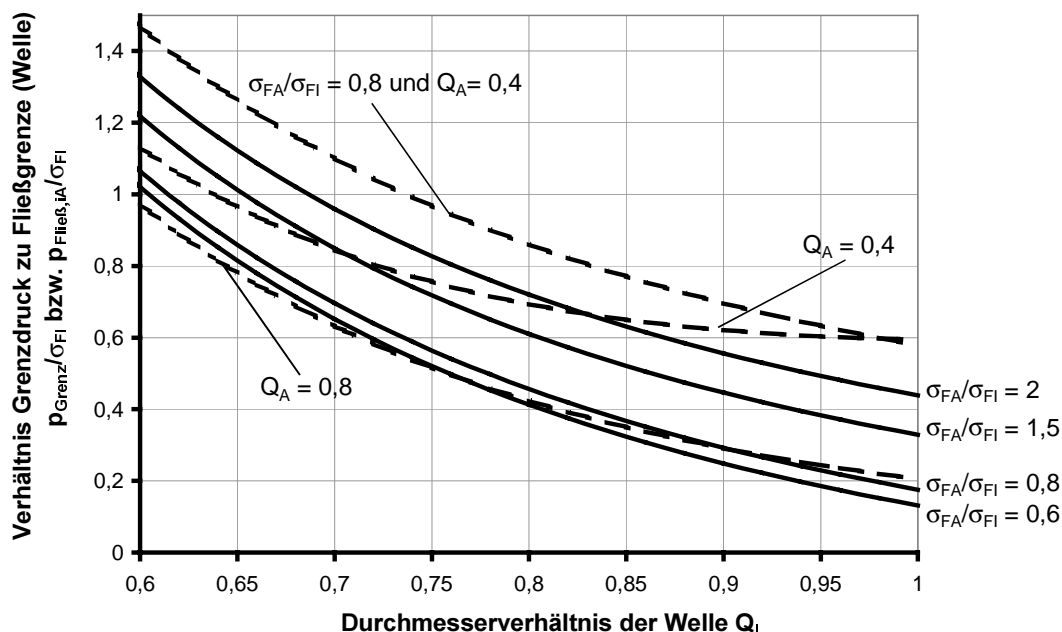
Das hydraulische Verfahren und die in der Regel rotationssymmetrischen Fügepartner bieten gute Voraussetzungen für eine analytische Betrachtung des Spannungs- und Verformungszustandes. Die im folgenden gezeigten Diagramme beruhen auf einer einfachen elastischen Berechnungsmethode, wie sie im Apparatebau allgemein bekannt ist. Ausgangspunkt sind die rotationssymmetrischen Gleichgewichtsbedingungen in Polarkoordinaten, die mit den Spannungs-Dehnungsbeziehungen eine homogene Differentialgleichung ergeben. Als Lösung erhält man ein rotationssymmetrisches ebenes Spannungsfeld.

Führt man in diesem Spannungsfeld die Fließbedingung nach von Mises ein, lässt sich über die Verformungsbeziehungen ein „unterer“ Grenzfügedruck ( $p_{\text{Grenz}}$ ) ermitteln, bei dem die Rückfederung der Nabe genauso groß ist, wie die Rückfederung der durchplastifizierten Welle, **Bild 5-d**. Somit stellt sich erst nach dem Überschreiten dieses Grenzfügedruckes ein Fugendruck ( $p_F$ ) ein, der zu einem

Presssitz führt. Im Wesentlichen ist dieser Grenzfügedruck von den Durchmesserhältnissen der Welle ( $Q_I = D_{il}/D_{al}$ ) und der Nabe ( $Q_A = D_{iA}/D_{aA}$ ) abhängig sowie über das E-Modul-Verhältnis und der Streckgrenze der Welle beeinflussbar.

$$p_{\text{Fluid}} \geq p_{\text{Grenz}} = f\left(Q_A, Q_I, \frac{E_A}{E_I}, \sigma_{FI}\right)$$

In **Bild 6** ist der auf die Fließgrenze der Welle bezogene „untere“ Grenzfügedruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie dargestellt. Die Kurve  $Q_A=0,001$  gibt den bezogenen Grenzfügedruck einer Welle-Nabe-Verbindung mit einer plattenähnlichen Nabe an. Die Kurve  $Q_A=1$  entspricht gerade dem bezogenen Fügedruck bei dem die Welle vollständig plastifiziert. Die untereinander verlaufenden Linien zeigen eine deutliche Abhängigkeit von dem Durchmesserhältnis der Nabe, die mit dem Durchmesserhältnis der Welle den Grenzfügedruck zur Fließgrenze der Welle beeinflussen. Bei dünnwandigen Naben wird daher ein geringerer Grenzfügedruck als bei dickwandigen benötigt, um gleiche Rückfederungen der Fügepartner zu erreichen. Dies führt bei dünnwandigen gegenüber dickwandigen Naben und gleichen Fügedrücken zu einem deutlich höher ausgebildeten Presssitz (gleicher Wellendurchmesser angenommen), vgl. auch hierzu ergänzend **Bild 8**. Umgekehrt ist bei dickwandigen Naben die Steifigkeit höher und dementsprechend die Nachgiebigkeit geringer. Dies hat dann wiederum zur Folge, dass die Rückfederung der Nabe geringer ausfällt, was dann



**Bild 7:** Streckgrenzengrenzenverhältnis und bezogener Grenzdruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie

zu geringeren Fugendrücken führt. Werden verschiedene Nabensteifigkeiten bei gleicher maximaler Aufweitung verglichen, so ist diese bei dickwandigen Naben mit einer vergleichsweise größeren gemeinsamen Rückfederung verbunden, als bei dünnwandigen Außenteilen. Es bildet sich ein höherer Passfugendruck aus!

Wird während des Fügeprozesses die Nabe plastifiziert, können unerwünschte Behinderung der Rückfederung der Nabe durch die Plastifizierungszone entstehen, **Bild 5-f**. Daher ist zu fordern, dass die Nabe nicht plastifizieren darf. Außerdem ist dieses aus dem Apparatebau entstandene Berechnungsmodell wegen den getroffenen Annahmen für Vorhersagen, bei dem die Innenfaser der Nabe plastifiziert, nicht gültig. Dieser „obere“ Grenzfugendruck  $p_{\text{Fließ, iA}}$ , der nötig ist, um die Nabe zu plastifizieren, ist hauptsächlich von dem Streckgrenzenverhältnis der Nabe zur Welle und den Durchmesser- verhältnissen abhängig. Wird also eine höhere Streckgrenze der Nabe gewählt, kann durch einen höheren Grenzfugendruck der Presssitz stärker ausgebildet werden. Eine erhebliche Steigerung der Drehmomenten- bzw. Kraftübertragung ist die Folge.

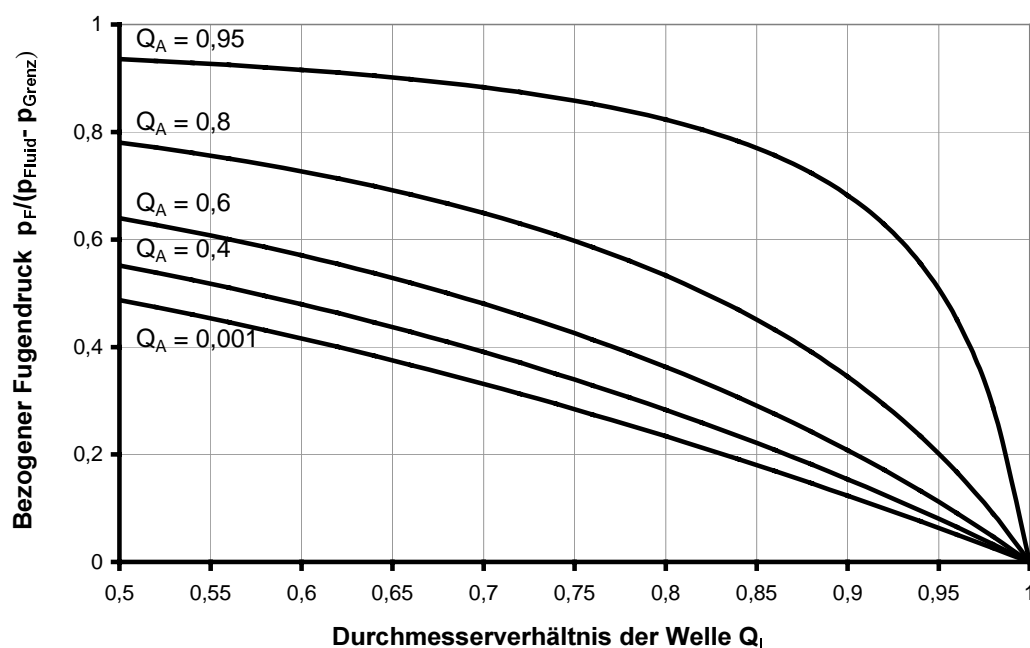
$$p_{\text{Fluid}} \leq p_{\text{Fließ, iA}} = f\left(Q_A, Q_I, \frac{\sigma_{FA}}{\sigma_{FI}}\right)$$

**Bild 7** zeigt für das Nabendurchmesser- verhältnis  $Q_A=0,8$  mehrere dazugehörige Streckgrenzen- verhältnisse ( $\sigma_{FA}/\sigma_{FI}=0,6; 0,8; 1,5; 2$ ). Die Kurven zei-

gen, dass sich bei einem Nabendurchmesser- verhältnis  $Q_A=0,8$  und Streckgrenzenverhältnis  $\sigma_{FA}/\sigma_{FI}=0,6$  ein Presssitz ohne Plastifizieren der Nabe nur dann einstellt, wenn das Wellendurch- messerverhältnis kleiner  $Q_I=0,77$  ist. Dagegen er- höhen größere Streckgrenzenverhältnisse das Po- tential für einen festeren Presssitz ohne die Plasti- fizierung der Nabe zu riskieren ( $\sigma_{FA}/\sigma_{FI}=1,5; 2$ ). Die beiden Kurven  $Q_A=0,4$  und  $\sigma_{FA}/\sigma_{FI}=0,8$  (für  $Q_A=0,4$ ) verdeutlichen lediglich die bereits angesprochene Abhängigkeit.

Der „untere“ und „obere“ Grenzfugedruck, die den aufzubringenden Fügedruck begrenzen, sind damit sowohl von der Geometrie der Welle und Nabe ab- hängig als auch vom Werkstoffverhalten der Füge- partner, gekennzeichnet durch die Streckgrenzen (Fließgrenzen) und E-Moduli.

Neben der Kenntnis des Arbeitsbereiches - „unterer“ und „oberer“ Grenzfugedruck - ist die Vorher- sage des entstehenden Passfugendruckes bei ge- gebenen Fügedruck oder die Vorhersage des Fü- gedruckes bei gefordertem Passfugendruck von besonderer Bedeutung. **Bild 8** zeigt den bezoge- nen Fugendruck, der mit Hilfe von Dehnungsbezie- hungen ermittelt werden kann, in starker Abhängig- keit der Welle-Nabe-Geometrie. Mit den Bildern 6-8 ist somit eine Berechnung einer innenhochdruck- gefügten Pressverbindung für ein E- Modulverhältnis  $E_A/E_I = 1$  und  $\nu = 0,3$  theoretisch möglich.



**Bild 8:** Bezogener Fugendruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie

Betrachtet man den Passfugendruck in Abhängigkeit von der Wellenstreckgrenze (Bilder 6 und 8), so wird man feststellen, dass sich bei niedrigen Wellenstreckgrenzen gegenüber höheren Wellenstreckgrenzen stärkere Pressverbindungen ausbilden. Durch die geringere Wellenstreckgrenze vermindert sich das Rückfederungspotential der Welle. Die Welle-Nabe-Verbindung kann auf einem höheren Niveau ausgebildet werden.



**Bild 9:** Bezogener Fugendruck in Abhängigkeit von der Welle-Nabe-Geometrie, /2/

Bei diesem elastischen Berechnungsmodell wird der Einfluß des Füge-spiels aufgrund der getroffenen Annahmen nicht berücksichtigt. Diese Annahme ist berechtigt, solange sich die Welle im voll durchplastifizierten Zustand an die Nabe legt und ein idealplastisches Werkstoffverhalten angenommen wird. Die Drucküberstandslänge, also die axiale Positionierung der Sondendichtung unterhalb der Nabe, kann in einem rotationssymmetrischen ebenen Spannungszustand nicht berücksichtigt werden. Numerische Untersuchungen haben jedoch ergeben, dass sie einen entscheidenden Einfluß auf die Fugenpressungsausbildung an den Randzonen der Nabe haben, /3/. Durch die gezielte Positionierung der Dichtungen können diese Einflüsse auf den jeweiligen Anwendungsfall günstig abgestimmt werden und zu einer Drehmomentensteigerung beitragen.

#### 4 Anwendungen im Automobilbau

Seit wenigen Jahren wird diese neuartige Pressverbindung zur Herstellung gebauter Nockenwellen für Verbrennungsmotoren, Ausgleichswellen und für die Befestigung von Ketten- oder Riemenrädern angewendet, /2/. **Bild 9** zeigt die Nockenwelle des drei Zylinder Diesels (Smart). Dabei konnte eine Gewichtsreduzierung von etwa 50% durch die verfahrensbedingte Verwendung von Hohlwellen gegenüber konventionellen Pressverbindungen mit Vollwelle realisiert werden.

#### 5 Zusammenfassung

Die Einsatzmöglichkeit innenhochdruckgefügter Welle-Nabe-Verbindungen hat sich nicht nur im Apparatebau erfolgreich durchgesetzt, sondern beginnt insbesondere im Automobilbau stärker an Einfluß zu gewinnen. Dieses neuartige kraftschlüssige Maschinenelement überzeugt durch die Reduzierung der Fertigungs- und Montagetiefe genauso wie durch die deutliche Gewichtseinsparung gegenüber herkömmlichen Produktionsverfahren und durch die Möglichkeit der individuellen Werkstoffauswahl. Dabei muss die Werkstoffpaarung grundsätzlich so eingestellt werden, dass für einen hohen Passfugendruck eine geringe Rückfederung der Welle (geringe Nachgiebigkeit und Streckgrenze) gegenüber einer hohen Rückfederung der Nabe (geringen Steifigkeit und hohe Streckgrenze) vorliegt.

#### 6 Literatur

- /1/ Titze, H.; Wilke, H.-P.: Elemente des Apparatebaues. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1992
- /2/ N., N.: Die gebaute Nockenwelle - eine innovative Systemlösung aus dem Daimler-Chrysler Werk Hamburg. Firmenprospekt, Hamburg, 2001
- /3/ Garzke, M.: Auslegung innenhochdruckgefügter Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung. Dissertation, TU Clausthal, 2001 (Veröffentlichung in Vorbereitung)

# Untersuchungen zum Beanspruchungsverhalten spielbehafteter Längsstiftverbindungen

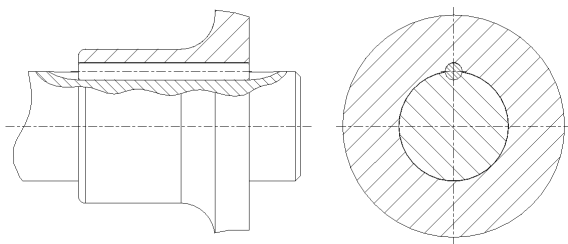
Birkholz, H.

*Für den Festigkeitsnachweis spielbehafteter Längsstift-Verbindungen existieren zurzeit keine erweiterten Dimensionierungsgrundlagen, in der Fachliteratur werden lediglich einfachste Berechnungsgleichungen zur Auslegung gegen Flächenpressung und Abscheren des Stiftes angegeben. Der Einfluss verschiedener Geometrieparameter bleibt dabei unberücksichtigt. Am Institut für Maschinenwesen wurden umfangreiche Untersuchungen zum Beanspruchungsverhalten drehmomentbelasteter Längsstiftverbindungen durchgeführt.*

*For the check of longitudinal pin connections with clearance are no extended sizing bases existing, in the technical literature only simplest calculation equations are indicated. The influence of different geometry parameters remains unconsidered. At the Institut für Maschinenwesen extensive investigations were executed for the behavior of torque-loaded longitudinal pin connections.*

## 1 Stand der Technik

Längsstiftverbindungen bestehen aus axial am Umfang angeordneten Stiften als Mitnehmerelemente (**Bild 1**). Die Stifte können dabei nach Anzahl und Anordnung variieren.



**Bild 1:** Längsstift als Mitnehmerelement in einer Welle-Nabe-Verbindung

Unterlagen zur Auslegung spielbehafteter Längsstiftverbindungen existieren nicht /1/. Es erscheint aber zulässig, die Angaben für spielfreie Verbindungen als Anhaltspunkte zu verwenden. Auch diese Auslegungshinweise fallen aber sehr kurz aus. Am Institut für Maschinenwesen wurden im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsprojektes erste Dimensionierungsgrundla-

gen für spielbehaftete Längsstiftverbindungen erarbeitet.

## 2 Ermittlung von Formzahlen

### 2.1 Formzahlen für Torsion

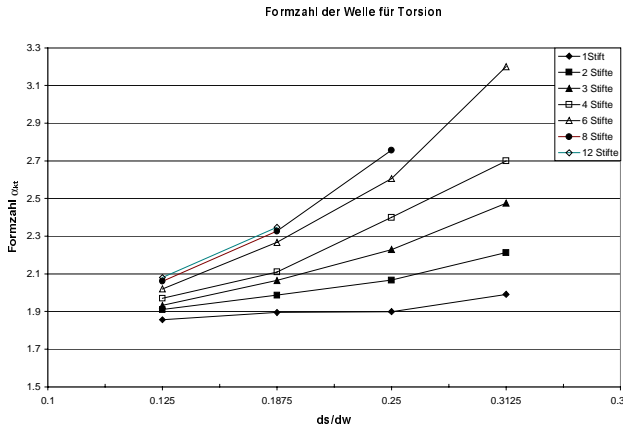
Auf Grund des Mangels an Erkenntnissen über die Gestalt- und Dauerfestigkeit von Wellen und Naben, die durch eine halbkreisförmige Nut in axialer Richtung geschwächt sind /2/, konzentrierten sich die Arbeiten zunächst auf die Ermittlung von Formzahldiagrammen für Welle und Nabe mit Hilfe der Finiten-Element-Methode. Dazu wird die höchste, in der FE-Rechnung ermittelte Kerbspannung zur analytisch berechneten Spannung im ungestörten Querschnitt ins Verhältnis gesetzt:

$$\alpha_K = \frac{\text{maximale Kerbspannung aus FEM}}{\text{Nennspannung, rechnerisch}} \quad (1)$$

Diese Methodik wurde für die wellen- und naben-seitige Nut bei verschiedenen Belastungsarten und Geometrievariationen durchgeführt:

- **Welle:** Verhältnis von Stiftdurchmesser zu Wellendurchmesser  $d_S/d_W$ ; Anzahl der Mitnehmerelemente
- **Nabe:** Verhältnis von Nabenaußendurchmesser zu Wellendurchmesser  $d_{a,N}/d_W$  bei verschiedenen  $d_S/d_W$ ; Anzahl der Mitnehmerelemente

Zur Klärung der Einspann- und Lastbedingungen wurde zunächst für jeweils eine ungeschwächte Geometrie analytisch und mittels FEM die Beanspruchung ermittelt. Die gewählten Randbedingungen in Anlehnung an /8/ hatten maximale Abweichungen zur analytischen Rechnung von < 1% zur Folge, d.h. es wurde eine ausreichend hohe Genauigkeit sicher gestellt. Die Lage der Stifte wurde so angesetzt, dass der Fugenradius zwischen Welle und Nabe durch den Stiftmittelpunkt verläuft. Anschließend erfolgten die Parameterrechnungen unter Anwendung dieser Randbedingungen. **Bild 2** zeigt das Formzahldiagramm der Welle für Torsion.

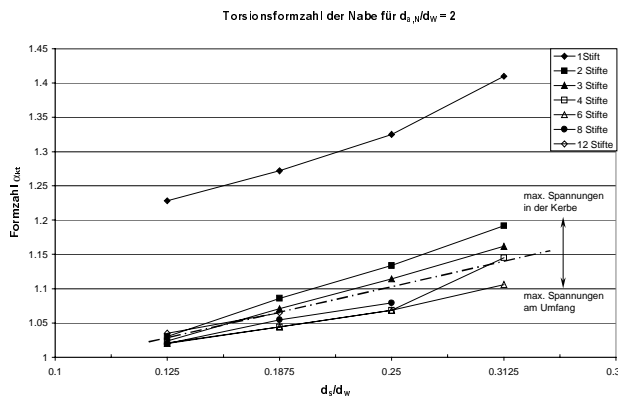


**Bild 2:** Torsionsformzahl für die Welle für verschiedene Verhältnisse  $d_s/d_w$  und  $n$  Stifte

Für 8 und 12 Stifte ergaben sich bei  $d_s/d_w > 0,25$  bzw. 0,1875 keine sinnvollen Geometrien mehr, so dass Formzahlen für diesen Bereich nicht ermittelt werden konnten. Aus den Kurven wurden anschließend Gleichungen zur analytischen Ermittlung der Formzahlen abgeleitet.

Es ist zu bemerken, dass, obwohl mit steigendem Verhältnis  $d_s/d_w$  der Kerbradius zunimmt und somit günstiger ausfällt, ein Ansteigen der Formzahlwerte eintritt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Einfluss der verminderten tragenden Querschnittsfläche den Einfluss des vergrößerten Radius der Kerben überwiegt.

**Bild 3** zeigt die ermittelten Formzahlen für die Nabe für ein Verhältniss  $d_{a,N}/d_w = 2$ .



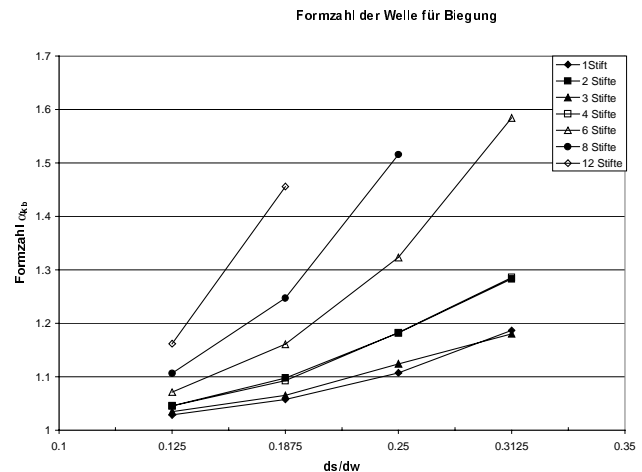
**Bild 3:** Torsionsformzahl der Nabe,  $d_{a,N}/d_w = 2$ ; verschiedene Verhältnisse  $d_s/d_w$  und  $n$  Stifte

Die Formzahldiagramme wurden ebenfalls für Verhältnisse  $d_{a,N}/d_w = 1,5$  und  $d_{a,N}/d_w = 2,5$  aufgestellt. Je weiter der betrachtete Punkt einer Hohlwelle von der Mittelachse entfernt ist, desto größer ist die Torsionsspannung, die an diesem Punkt auftritt. Daher muss die maximale Spannung nicht notwendigerweise in der innenliegenden Kerbe auftreten. In Bild 3 ist zusätzlich zu den Formzahlverläufen der Übergangsbereich der auftretenden Maximal-

spannung von innen nach außen dargestellt. Bei einem Verhältnis  $d_{a,N}/d_w = 1,5$  liegt die Maximalspannung hingegen unabhängig von der Anzahl der Stifte und dem Verhältnis  $d_s/d_w$  immer im Bereich der Kerbe, bei einem Verhältnis von  $d_{a,N}/d_w = 2,5$  tritt die Maximalspannung immer am Außendurchmesser auf.

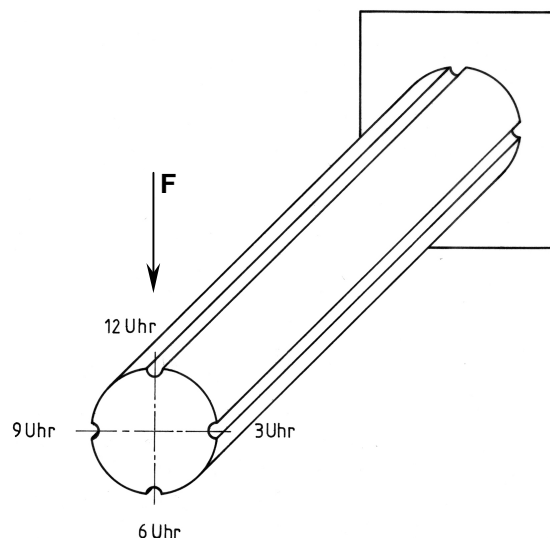
## 2.2 Formzahlen für Biegung

Analog zur Vorgehensweise bei der Ermittlung von Formzahlen für Torsion erfolgte die Aufstellung von Formzahldiagrammen für Biegebelastung. **Bild 3** zeigt das Formzahldiagramm für die Welle.



**Bild 3:** Biegeformzahl für die Welle für verschiedene Verhältnisse  $d_s/d_w$  und  $n$  Stifte

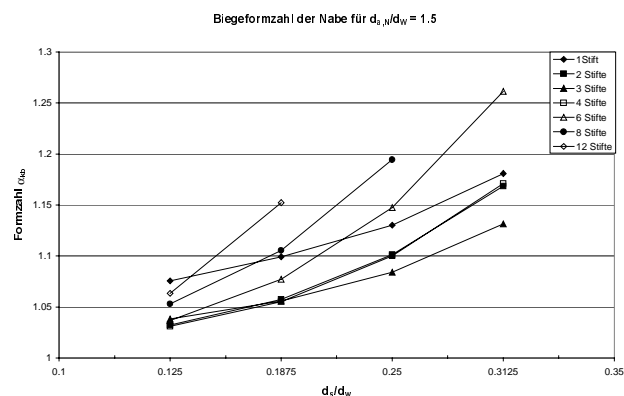
Auch für diese Belastungsart ist das Zusammenspiel von Kerbradius und geschwächtem Querschnitt zu beobachten. Es fällt weiterhin auf, dass die Formzahlen für einen und drei Stifte sowie für zwei und vier Stifte nahezu identisch sind. Dies liegt in der Anordnung der Nuten zur Belastungsrichtung begründet. **Bild 4** verdeutlicht diesen Sachverhalt.



**Bild 4:** Lage der Nuten zur Belastungsrichtung

Mit Lage mindestens einer Nut an der Stelle der größten Zugspannungen und einer für alle Stiften zahlen gleichmäßigen Verteilung über dem Umfang erhält man bei zwei Stiften eine Nut bei 12 Uhr und, um 180 Grad versetzt, eine Nut bei 6 Uhr. Bei vier Stiften kommen zusätzlich Nuten an 3 und 9 Uhr hinzu, diese liegen jedoch in der neutralen Faser. Ähnlich verhalten sich ein und drei Nuten, 3 Nuten liegen um 120° versetzt und damit in wenig beanspruchten Bereichen.

**Bild 5** zeigt abschließend das Biegeformzahldiagramm für die Nabe mit einem Verhältnis  $d_{a,N}/d_W = 1,5$ .



**Bild 5:** Biegeformzahl der Nabe,  $d_{a,N}/d_W = 1,5$ ; verschiedene Verhältnisse  $d_s/d_W$  und n Stifte

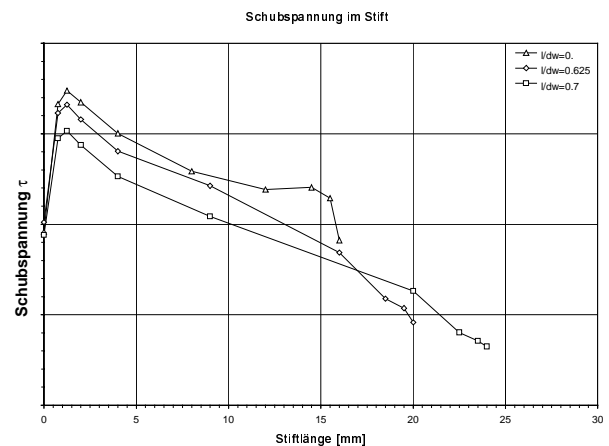
Die Werte für  $d_{a,N}/d_W = 2$  und  $d_{a,N}/d_W = 2,5$  liegen deutlich unter den in Bild 5 dargestellten Werten. Schon beim Verhältnis  $d_{a,N}/d_W = 2$  liegt die maximal auftretende Formzahl bei  $\alpha_{kb} = 1,07$ , so dass bei einem Festigkeitsnachweis die Verwendung einer Formzahl  $\alpha_{kb} = 1,1$  ab einem Verhältnis  $d_{a,N}/d_W = 2$  eine konservative Auslegung darstellt.

### 3 Einfluss der Verbindungsbreite auf die Tragfähigkeit

Die wenigen verfügbaren Quellen geben als Anhaltswert zur Dimensionierung einer Längsstiftverbindung ein Verhältnis von Verbindungslänge zu Wellendurchmesser  $l/d_W$  von 1...1,5 an /3, 4, 5/. Umfangreiche Untersuchungen an Zahnwellenverbindungen zeigten aber /6/, dass ab einem Verhältnis  $b/d_B > 0,6$  ( $b$ : Verbindungsbreite,  $d_B$ : Bezugsdurchmesser) die durch den Steifigkeitssprung am Verbindungsbeginn hervorgerufene maximale Beanspruchung am Verbindungsanfang nicht mehr reduziert werden kann, sie nur steiler in axialer Richtung abfällt (größerer Spannungsgradient), um dann auf geringem Niveau bis zum Verbindungsende abzuklingen.

Da die Geometrie einer Längsstift-Verbindung eine Analogie zu Zahnwelle nahelegt, wurde der Bereich  $l/d_W = 0,5...0,75$  einer näheren Betrachtung unterzogen.

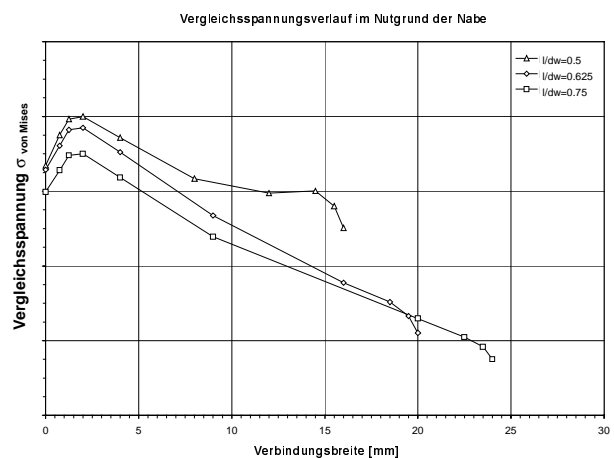
**Bild 6** zeigt den Einfluss der Verbindungslänge auf den Stift.



**Bild 6:** Einfluss der Verbindungsbreite auf die Beanspruchung im Stift für  $d_s/d_W = 0,125$ ;  $d_W = 32\text{mm}$ , 4 Stifte

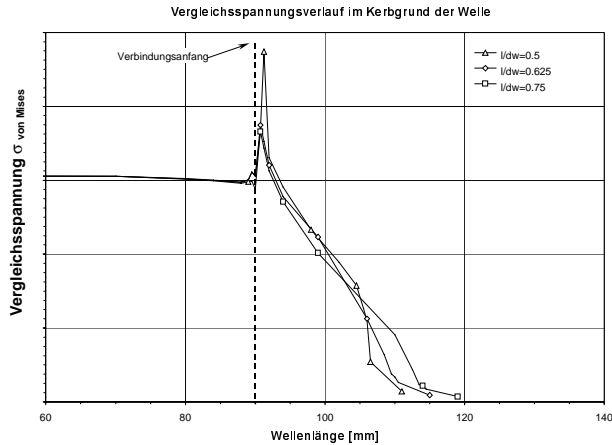
Es ist ein deutlicher Einfluss der Verbindungslänge auf den Stift zu erkennen, die Schubspannungen konnten mit einer längeren Verbindung um bis zu 16% vermindert werden. Dies legt den Schluss nahe, dass eine größere Verbindungsbreite die Beanspruchung der gesamten Verbindung vermindert.

**Bild 7** zeigt den Vergleichsspannungsverlauf im Nutgrund der Nabe. Analog zum Stift kann eine Verminderung der Beanspruchung in der Nabe beobachtet werden, die in der gleichen Größenordnung liegt.



**Bild 7:** Einfluss der Verbindungsbreite auf die Beanspruchung in der Nabe für  $d_s/d_W = 0,125$ ,  $d_W = 32\text{mm}$ , 4 Stifte

**Bild 9** zeigt den Vergleichsspannungsverlauf für die Welle.

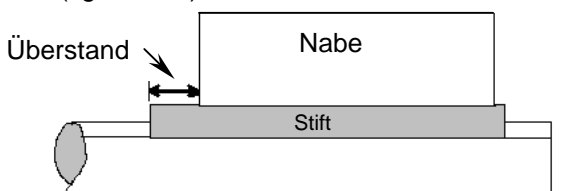


**Bild 7:** Einfluss der Verbindungsbreite auf die Beanspruchung in der Welle für  $d_S/d_W = 0,125$ ,  $d_W = 32\text{ mm}$ , 4 Stifte

Die Veränderung der Verbindungsbreite wirkt sich im Gegensatz zu Stift und Nabe deutlich stärker aus. Man erkennt einen übereinstimmenden Vergleichsspannungsverlauf für alle Verhältnisse  $l/d_W$  im ungestörten Bereich der Welle, also vor dem Verbindungsbeginn. Mit Verbindungsbeginn schließt sich ein Bereich deutlicher Spannungsüberhöhung an, der für das Verhältnis  $l/d_W = 0,5$  einen um ca. 60% gegenüber dem ungestörten Bereich erhöhten Wert aufweist. Mit Verlängerung der Verbindungsbreite kommt es zu einer deutlichen Reduzierung der Spannungsüberhöhung auf 19%, dabei ist zu beobachten, dass ab dem Verhältnis  $l/d_W = 0,625$  keine signifikante Verminderung der Spannungsüberhöhung mehr auftritt. Auch für eine Längsstiftverbindung kann also die Empfehlung gegeben werden, ein Verhältnis Verbindungsbreite zu Wellendurchmesser  $l/d_W = 0,6 \dots 0,7$  einzuhalten.

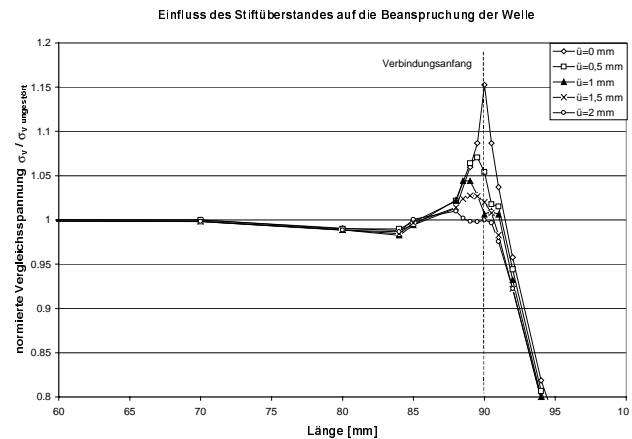
#### 4 Einfluss des Stiftüberstandes auf die Beanspruchung der Verbindung

Bei der Untersuchung der Verbindungsbreite schlossen die Stifte bündig mit der Nabe ab. Ziel der folgenden Betrachtung war, den Einfluss eines am Verbindungsbeginn überstehenden Stiftes auf die Spannungen in Welle, Nabe und Stift zu ermitteln (vgl. **Bild 8**).



**Bild 8:** Stiftüberstand am Verbindungsbeginn

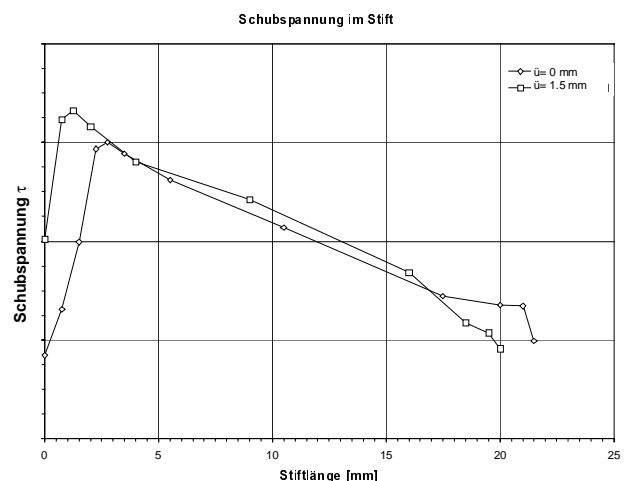
Besonders interessant ist die Darstellung der Wellenbeanspruchung, **Bild 9**. Die Normierung erfolgte auf den Wert der Vergleichsspannung im Bereich ungestörter Torsion.



**Bild 9:** Einfluss des Stiftüberstandes auf die Beanspruchung der Welle.  $d_S/d_W = 0,125$ ; 4 Stifte

Ab einer Überstandslänge von 1,5 mm tritt eine deutliche Verminderung der Beanspruchung im Nutgrund auf. Zwar treten hier auch noch Unstetigkeiten auf, die Überhöhung am Verbindungsanfang ist jedoch ab einer Überstandslänge von 1,5 mm marginal. Die Ursache ist im weicheren Übergang der Belastungseinleitung zu suchen, d. h., der Steifigkeitssprung wird in zwei kleinere Sprünge zerlegt.

**Bild 10** zeigt die Schubspannung im Stift für 0 mm Überstand und 1,5 mm Überstand. Die Verschiebung der Maxima resultiert aus der Skalierung, da die Schubspannung über der Längskoordinate des Stiftes mit Ursprung am Verbindungsanfang von Stift und Welle aufgetragen ist.



**Bild 10:** Einfluss der Überstandslänge auf die Schubspannung im Stift.  $d_S/d_W = 0,125$ ; 4 Stifte,  $d_W = 32$ ;  $l/D_W = 0,625$



Für den Stift wirkt sich die Vergrößerung der Überstandslänge ebenfalls positiv aus, hier kann die Schubspannung um ca. 10% reduziert werden.

Der Einfluss des Stiftüberstandes auf die Nabe ist in **Bild 11** dargestellt.

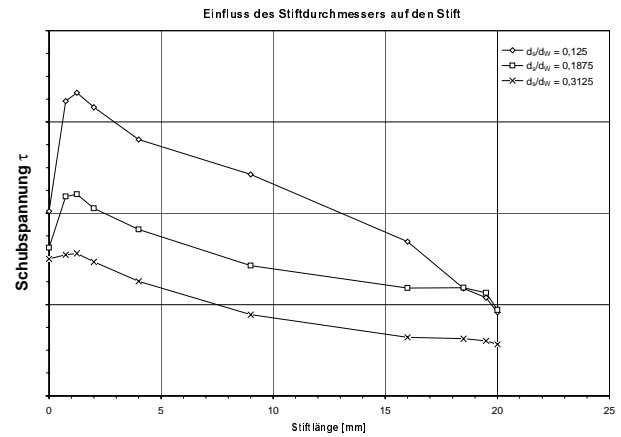


**Bild 11:** Einfluss des Stiftüberstandes auf die Nabe.  $d_S/d_W = 0,125$ ;  $d_{a,N}/d_W = 2$ ;  $d_W = 32$   
4 Stifte

Die Spannungen in der Nabe werden schon auf Grund des Kraftflusses immer in Richtung Verbindungsanfang ansteigen, d.h. die Überhöhung ist nicht als Folge eines Steifigkeitssprunges zu sehen, da die Steifigkeit für die Nabe betrachtet durch den Kontakt mit Stift und Welle kaum zunimmt. Die leicht steigenden Spannungen am Verbindungsbeginn sind durch die im überstehenden Stiftende zwischen Welle und Stift wirkenden Kräfte zu erklären, die unmittelbar am Verbindungsanfang Stift/Nabe in die Nabe eingeleitet werden. Daraus ergibt sich, dass dem Stiftüberstand Grenzen gesetzt sind, wird er zu groß, wird im freien Stiftende der Schubkomponente eine Biegekomponente überlagert, die zunehmenden Einfluss auf die Belastungen im Stift hat. Ein weiterer Nachteil ergibt sich durch die Zunahme der Baulänge.

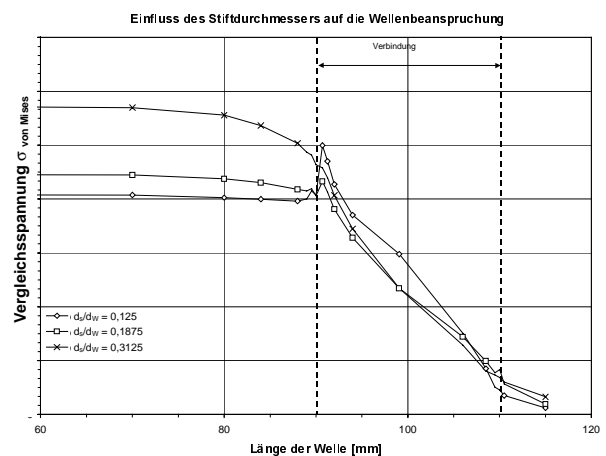
## 5 Einfluss des Stiftdurchmessers auf die Beanspruchung der Verbindung

Durch die Erhöhung des Stiftdurchmessers und damit die Vergrößerung der Scherfläche ist ein Absinken der Schubspannungen im Stift zu erwarten. **Bild 12** verdeutlicht diesen Sachverhalt. Die Schubspannungen im Stift werden deutlich reduziert.



**Bild 12:** Einfluss des Stiftdurchmessers auf die Stiftbeanspruchung. 4 Stifte,  $d_W = 32$ ;  
 $l/D_W = 0,625$ ;  $d_{a,N}/d_W = 2$

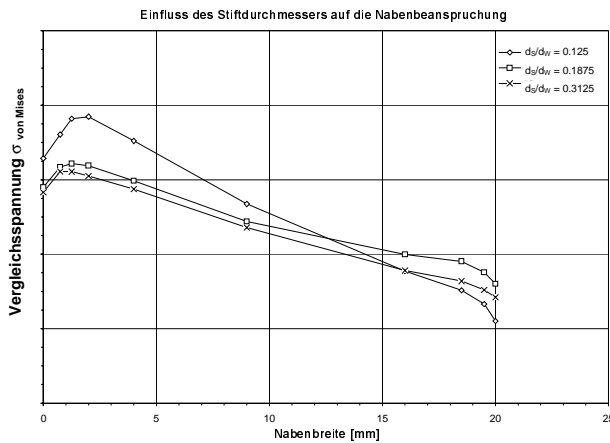
Den Spannungsverlauf im Kerbgrund der Welle zeigt **Bild 13**.



**Bild 13:** Einfluss des Stiftdurchmessers auf die Wellenbeanspruchung. 4 Stifte,  $d_W = 32$ ;  
 $l/D_W = 0,625$ ;  $d_{a,N}/d_W = 2$

Durch die Erhöhung des Stiftdurchmessers wird auf der einen Seite die Spannungsspitze am Verbindungsanfang abgebaut, gleichzeitig wird aber auch der Querschnitt der Welle geschwächt, so dass die Spannungen vor dem Kontakt deutlich steigen. Bei einem Stiftdurchmesser  $d_S = 6$  mm, welcher einem Verhältnis  $d_S/d_W = 0,1875$  entspricht, kommt es bei einer Verbindung mit 4 Stiften dazu, dass die Spannungen vor und im Kontakt nahezu gleich sind.

Anders als in der Welle sinkt die Vergleichsspannung in der Nabe, wobei ab einem Stiftdurchmesser von 6 mm die Veränderungen nur noch gering sind, **Bild 14**. Für größere Stiftdurchmesser  $d_S > 10$  mm ist mit einem Anstieg der Spannungen zu rechnen, da sich der tragende Querschnitt verringert.



**Bild 14:** Einfluss des Stiftdurchmessers auf die Nabenbeanspruchung. 4 Stifte,  $d_W = 32$ ;  $l/D_W = 0,625$ ;  $d_{a,N}/d_W = 2$

## 6 Zusammenfassung

Für eine Welle-Nabe-Verbindung mit axial angeordneten Stiften wurden durch umfangreiche Parameterstudien Formzahldiagramme für Welle und Nabe für die Belastungen Torsion und Biegung erarbeitet.

Betrachtet man das Gesamtsystem Längsstiftverbindung, konnte der Einfluss verschiedener Geometrievariationen deutlich gemacht werden. Ein Überstand des Stiftes am Verbindungsbeginn senkt die Beanspruchungen in Stiften und Welle, der Einfluss auf die Nabe ist eher gering. Der Vorteil gegenüber anderen spannungssenkenden Maßnahme wie Erhöhung der Stiftanzahl oder Vergrößerung des Stiftdurchmessers liegt darin, dass weder die Welle noch die Nabe durch eine höhere Kerbwirkung geschwächt wird, noch der Fertigungsaufwand durch zusätzliche Nuten und Stifte steigt.

## 7 Literatur

- /1/ Faulwasser, M.: Beanspruchungsverhalten drehmomentbelasteter Längsstiftverbindungen. unveröffentlichte Studienarbeit, IMW, TU Clausthal, 1998
- /2/ Kollmann, F.G.: Welle-Nabe-Verbindungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg u.a., 1984
- /3/ Niemann, G.: Maschinenelemente. Erster Band: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 2. Auflage Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1981
- /4/ Fronius, St.: Taschenbuch Maschinenbau in acht Bänden. Dritter Band: Maschinenelemente, Getriebe, Mechanismen, Hydrostatische und pneumatische Antriebe, Elektrische Antriebe. Berlin. Verlag Technik 1987

- /5/ Wächter, K.: Konstruktionslehre für Maschineningenieure. Grundlagen, Konstruktions- und Antriebselemente. Berlin: Verlag Technik 1987
- /6/ Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Düsseldorf: VDI Verlag 1997
- /7/ Paton, E.: European Projekt Report: Investigation into development of a calculation basis for dimensioning axial pin shaft-hub connections. unveröffentlichte Studienarbeit TU Clausthal, 2000
- /8/ Wesolowski, C.: Ausnutzung von Symmetrieebenen zur Berechnung drehmomentbeanspruchter Bauteile. Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen Nr. 19; Clausthal 1994

# Bauteilkonstruktion mit kombinierten Werkstoffen – Möglichkeiten und Grenzen am Beispiel verfahrenstechnischer Maschinen

Dietz, P.; Grünendick, T.

*Der Aufsatz stellt in Auszügen einen Vortrag dar, der in der VDI-EKV Tagung: „Innovative Produkte durch neue Werkstoffe“ am 18. und 19. Oktober 2001 in Würzburg gehalten wurde. Erstveröffentlichung VDI-Berichte 1595, ISBN 3-18-091595-01.*

*The contribution is a except of a lecture which was discussed within the framework of the VDI-EKV congress: „Innovative Produkte durch neue Werkstoffe“ at the 18th and 19th October 2001 in Würzburg. First publication VDI-Berichte 1595, ISBN 3-18-091595-01.*

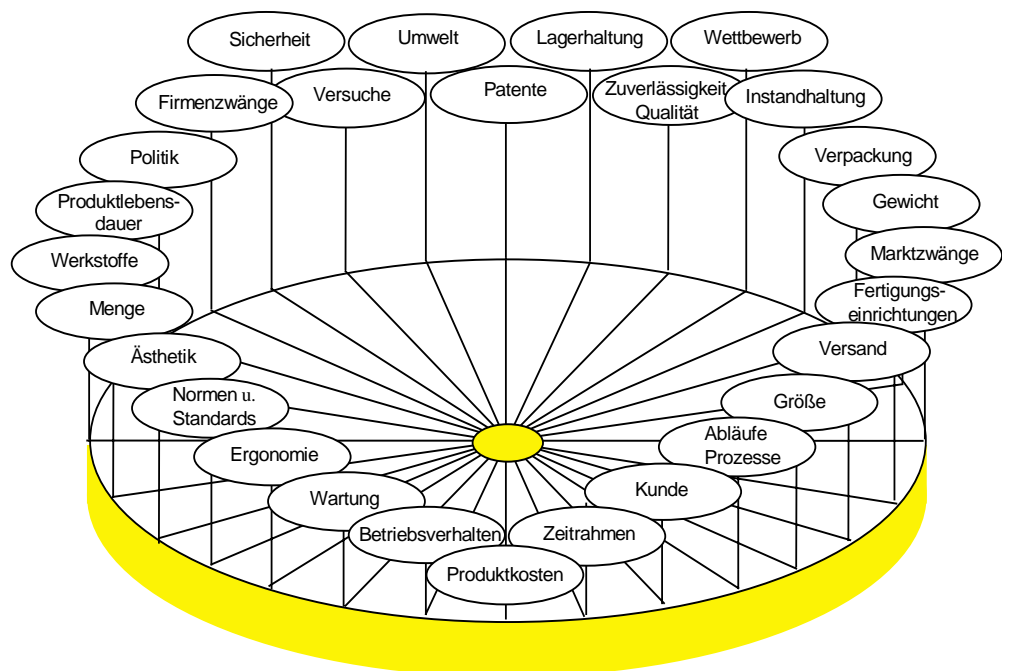
## 1 Einleitung, Werkstoffwahl als Aufgabe des Konstrukteurs

Eine Reihe von Veröffentlichungen in Fachzeitschriften der letzten Zeit erwecken den Eindruck, als ob die Entwicklung neuer Werkstoffe Hauptausgangspunkt für die Entwicklung marktgerechter Produkte wäre. Selbst einige Forschungsprogramme in Deutschland scheinen zu implizieren, dass man nur neue Werkstoffe zu entwickeln bräuchte und damit die Entwicklung neuer Produkte schon vorherbestimmt sei. Als Konstrukteur kann ich dies überhaupt nicht nachvollziehen, denn nach allen gängigen Vorstellungen des Produktentwicklers ist die Idee, die Entsprechung der Anforderung durch ein Lösungsprinzip, die treibende Kraft der Entwicklung neuer und innovativer Produkte. Die Wahl des Werkstoffes spielt demgegenüber eine nachgeordnete Rolle, denn ich bin grundsätzlich nur auf die Erfüllung der von mir angestrebten Eigenschaften eines Produktes aus. Und dabei bedeutet die Wahl eines neuen Werkstoffes ei-

gentlich nur, dass die mir bekannten Werkstoffe – also die, die ich am liebsten verwenden würde, weil sie mir in ihren Eigenschaften wie in ihrem Fertigungsverhalten bekannt und vertraut sind – irgendwelche Forderungen an meine neue Konstruktionsidee nicht erfüllen. Hieraus sei eine erste These für die Anwendung von Werkstoffen in innovativen Produkten abgeleitet

- **Die Wahl des Werkstoffes stellt aus der Sicht des Konstrukteurs eine Restriktion dar, die mit dem eigentlichen schöpferischen Prozess der Produktentwicklung nichts zu tun hat.**

Grundlage der Produktentwicklung ist immer eine Reihe von Anforderungen, die aus einer Vielfalt von Bereichen stammen und oft weit weg von den zu erreichenden Funktionen sind. **Bild 1** zeigt am Beispiel einer schon 1902 konzipierten Darstellung, dass wir es hier mit einem Problem zu tun haben, das bereits seit dem Beginn des Industriezeitalters besteht. Demgegenüber hat jeder Werkstoff eine Unmenge von Eigenschaften, die mit dem vorher gezeigten Anforderungsprofil abgeglichen werden



**Bild 1:** Mögliche Bereiche der Anforderungsdefinitionen an ein Produkt /1, 2/

müssen. Als Beispiel dient **Bild 2** als Auszug aus einer Datenbank Anwendung zur Suche nach einem geeigneten Stahlwerkstoff. Man erkennt, dass selbst bei diesen bekannten Werkstoffen nur eine geringe Chance für eine gute Übereinstimmung von Produktanforderungen und Werkstoffeigenschaften besteht. Hieraus folgt die zweite These:

- **Die Wahl eines Werkstoffes stellt immer einen Kompromiss dar, in dem spezifische Merkmale eines Werkstoffs die vom Produkt geforderten Eigenschaften begünstigen, andere Merkmale aber den Anforderungen nicht gerecht werden.**

aus ist aber auch ableitbar, dass man mit Hilfe von Werkstofftechnologien bestimmte Eigenschaften forcieren kann, z.B. bei Legierungen, oder dass man auf der konstruktiven Kombination von Bauteilen aus unterschiedlichen Eigenschaften den nach wie vor vorhandenen Kompromiss etwas in Richtung der gewünschten Produkteigenschaften verschieben kann. Hieraus folgt die dritte These:

- **Durch die Kombination von Werkstoffen bei der Gestaltung eines Produktes besteht die Chance der Anforderungserfüllung für dieses Produkt eher als durch die Verwendung eines einzelnen Werkstoffes.**

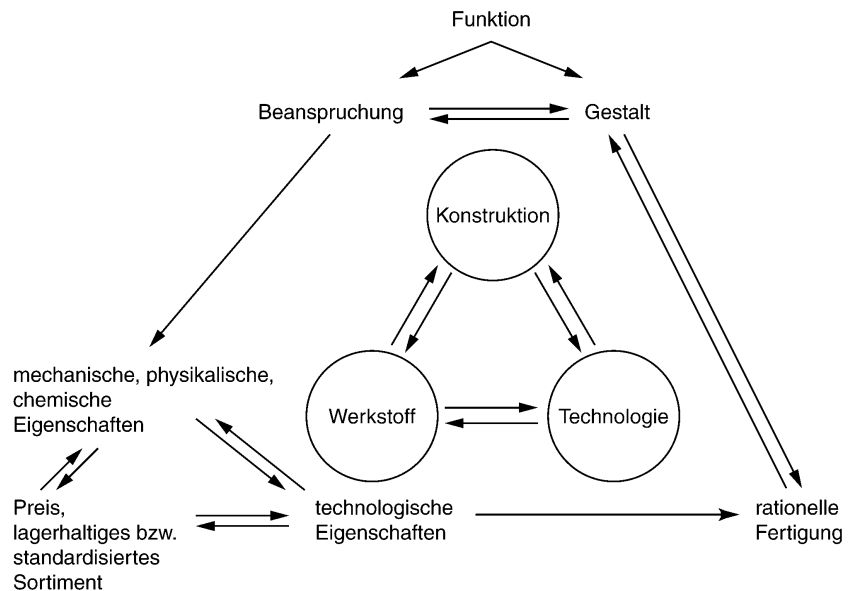
**Bild 2:** Werkstoffsuche mit der Datenbank Anwendung Stahlikon, /3/

Hieraus ist zunächst zu schließen, dass es den idealen Werkstoff nicht gibt – auch nicht für eine speziell ausgewählte Konstruktionaufgabe. Hier-

Hiervon leben seit Generationen schon Konstrukteure bei der Gestaltung von Oberflächenschutzstrukturen, Verschleiß einsätzen oder der Entwick-

lung von faserverstärkten Tragstrukturen. Wesentlich dabei ist, dass dem Konstrukteur dabei die Aufgabe zukommt, mit Hilfe der Werkstoff- und der Fertigungstechnik die Eigenschaften zu konstruieren, denn die Erstellung des Bauteils ist meist mit der Schaffung der Werkstoffeigenschaften und damit der Erfüllung der Anforderung durch Integration der Werkstoff- und Herstellungstechnik verbunden. Diesen Aspekt stellt **Bild 3** /3/ dar, es stellt aber auch einen bisher wenig beachteten Gesichtspunkt heraus: Wenn wir von „marktgerechten“ Produkten sprechen, ist damit immer auch eine wirtschaftliche

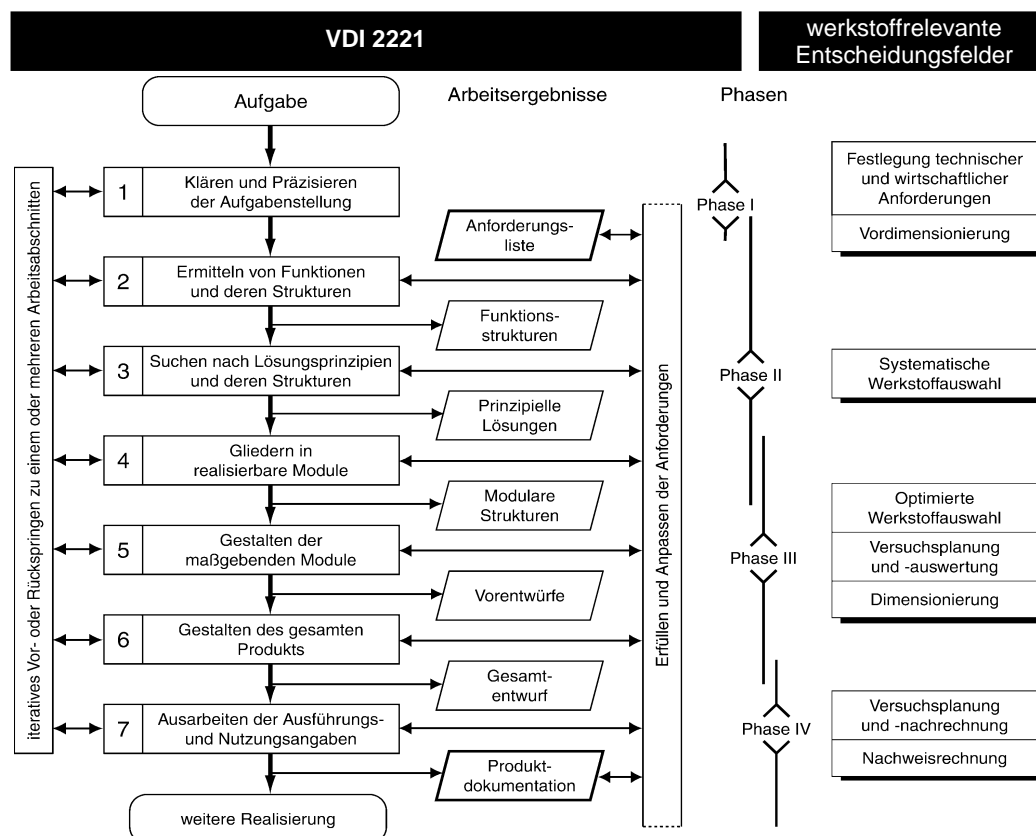
Herstellung gemeint. Die Wirtschaftlichkeit – und damit ist oft die Menge in die Produktion fließenden Materials verbunden – stellt in **Bild 3** einen eigenen Regelkreis dar, der die klassischen Kategorien „Konstruktion“, „Werkstoff“ und „Technologie“ empfindlich beeinflussen kann. Mit diesem Problem haben eine Reihe von Forschungsergebnissen zu kämpfen, die in den vergangenen Jahren in Materialforschungsprogrammen erzielt wurden.



**Bild 3:** Werkstoffauswahl unter dem Aspekt der Einheit von Konstruktion, Technologie und Werkstoff /3/

Es sei daher die vierte und letzte These genannt:

- **Der wirtschaftliche Erfolg der Anwendung neuer Werkstoffe zur Erzielung bestimmter Bauteileigenschaften ist abhängig von einer preisgünstigen Werkstoffherstellung, Bearbeitung und Montage der zu entwickelnden Bauteile.**



**Bild 4:** Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren nach VDI 2221 und werkstoffrelevante Entscheidungsfelder /4, 5/

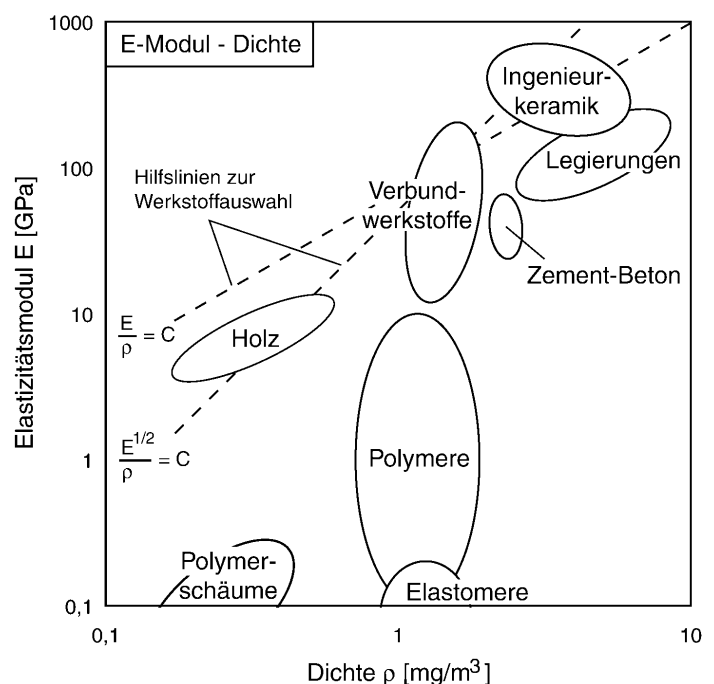
Auslegung	Anforderungen	Werkstoffauswahl
Näherungsweise Analyse	Konzeption	Betrachtung sämtlicher Werkstoffe (geringe Genauigkeit)
Analyse mit größerer Genauigkeit, Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit	Anwendungsform, Ausführungsart	Teilmenge an Werkstoffen (Höhere Genauigkeit)
Optimierung, Wirkungsgrad, Nutzeffekt	wie oben	weitere Einengung der infrage kommenden Werkstoffe
Detaillierte Analyse, Finite-Elemente-Berechnungen u.a.	Festlegung von Details	Festlegung eines Werkstoffes (bestmögliche Genauigkeit)
Exakte Dimensionierung	Erzeugnis	Verwendung des festgelegten Werkstoffes

**Bild 5:** Einordnung der Werkstoffauswahl in den allgemeinen Entwicklungsprozeß nach VDI 2221 (stark vereinfacht) (nach /6/)

In welcher Weise wählt der Konstrukteur im Laufe des Entwicklungsprozesses Werkstoffe oder Kombinationen aus? Ich zeige dies am Schema der Vorgehensweise nach VDI 2221 /4/ (**Bild 4**), bei der im rechten Teil die werkstoffrelevanten Entscheidungsfelder aufgezeigt sind: Im Normalfall wird die Werkstoff- und Fertigungsart in Schritt 5: „Gestalten der maßgebenden Module“ und die definitive Festlegung auf den Werkstoff in Schritt 6 „Gestalten des gesamten Produkts“ vorgenommen. Diese späte Auswahl ist im wesentlichen bedingt durch die bis zu diesem Zeitpunkt nur sehr unpräzise Formulierung von Abmessungen, Belastungen oder weiteren Randbedingungen der Konstruktion. Meist unterliegt die Werkstoffwahl einem fortschreitenden Einschränkungprozeß, wie ihn **Bild 5** beschreibt. Nur in sehr seltenen Fällen ist durch die Anforderungsliste eine Vorauswahl von Werkstoffen gegeben, meist beschränkt sich dies auf sehr spezielle chemische („beständig gegen ...“) oder physikalische Eigenschaften wie Betriebstemperatur, Gewichtsrestriktionen usw..

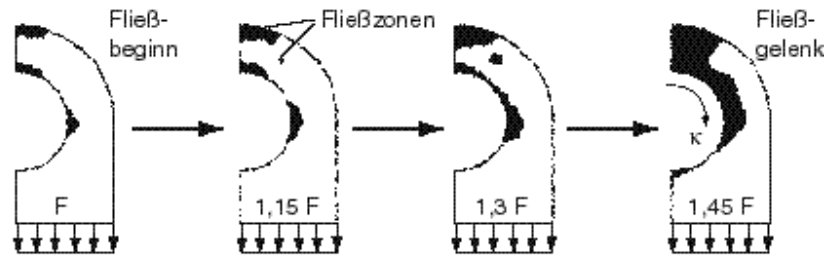
Die Problematik der Werkstoffauswahl liegt dabei auf einer ähnlichen Linie wie die Erfüllung von Anforderungen wie Lärmarmut, Wirtschaftlichkeit oder Ergonomie, da für eine eindeutige Beurteilung der Eigenschaften des Bauteils aufgrund der Werkstoffwahl eine sehr detaillierte Kenntnis der Charakteristika einer Konstruktion vorausgesetzt werden. Eine effektive Wahl und eine Optimierung bedürfen daher oftmals einer „Schleifenbildung“ im Konstruktionsprozeß, um eine schrittweise Verbesserung der Informationen während des Konstruktionsvorgangs sicherzustellen. Dabei handelt es sich

um einen mit zunehmendem Maße immer komplexeren Auswahlvorgang, da die Werkstoffentwicklungen ständig wachsen und z.B. die mit der konstruktiven Gestaltung von Verbundwerkstoffen verbundenen zahlreichen Kombinationsmöglichkeiten deren Auswahlprozeß deutlich erschweren. Nur selten gelingt es auch, unter Reduzierung auf wenige Auswahl Gesichtspunkte eine Auswahlmöglichkeit zu gestalten, wie sie z.B. in **Bild 6** unter dem Beispiel „leichte und steife Bauteilkonstruktion“ aufgezeigt wird.



**Bild 6:** Werkstoffschaubild nach Ashby (Performance Index  $E/\rho$  ist Indikator für leichte und steife Bauteile /7/)

Im folgenden soll an einigen Beispielen aufgezeigt werden, wie durch die gezielte Anwendung von Bauteilen aus kombinierten Werkstoffen konstruktive Lösungsmöglichkeiten für spezielle Entwicklungsaufgaben geschaffen wurden. Durch Spiegelung dieser Beispiele an den o.a. Thesen soll aber auch deutlich gemacht werden, dass der zur Erfüllung bestimmter Bauteileigenschaften geschlossene Kompromiß Einschränkungen bei anderen Eigenschaften verursacht, die zum Teil die gewählte Lösung in Frage stellen können.

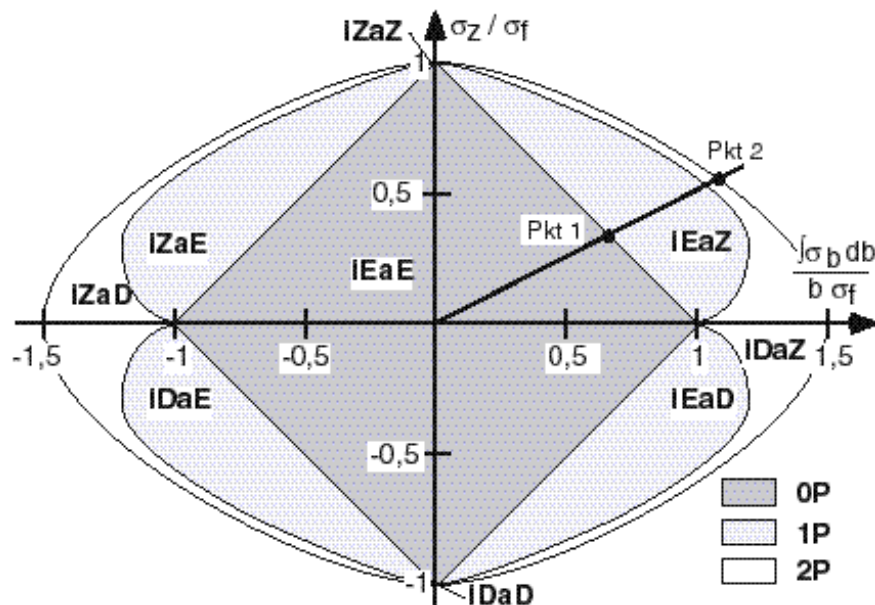


**Bild 7:** Plastizierungsfolgen einer spielbehafteten Bolzen-Lasche-Verbindung.  $\kappa$  Kontaktwinkel des Bolzen-Lasche-Kontakts;  $F$  Zuglast /8/

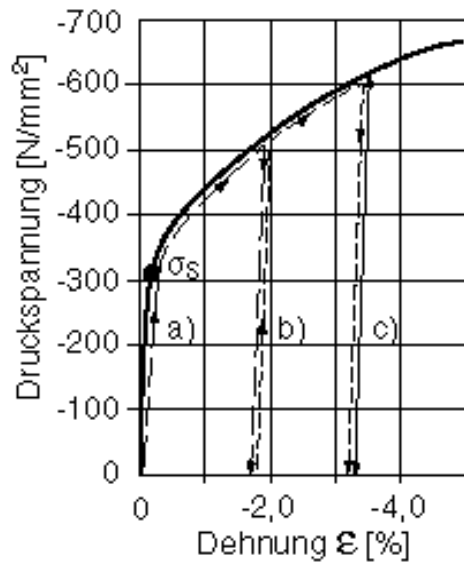
Die Grenzbeanspruchung von Maschinenteilen wird im allgemeinen nach dem Kriterium des linear-elastischen Verhaltens von Bauteil und Werkstoff ermittelt, das – durchaus nutzbare – Werkstoffverhalten bei überelastischer Beanspruchung wird meist als „zusätzliche Sicherheit“ nicht in die Berechnung mit einbezogen. **Bild 7** zeigt am Beispiel einer Bolzen-Laschenbverbindung, dass der eigentliche Versagensfall „Durchplastizieren“ ein auf 145% gesteigertes Lastübertragungspotenzial gegenüber der elastischen Rechnung enthält, weil der plastisch verformte Bereich selbst bei Berechnung nach dem idealplastischen Verhalten auf die Steifigkeit dieser Verbindung kaum Einfluß hat. Die In-

## 2 Nutzung der plastischen Verformung zur Tragfähigkeitssteigerung

An zwei Beispielen soll deutlich gemacht werden, dass die Erzeugung spezieller Eigenschaften nicht immer die Anwendung neuer Werkstoffe impliziert, sondern dass die Eigenschaftsveränderung eines einzigen Werkstoffes in Abhängigkeit vom Anwendungsbereich ein großes Potenzial für das Prinzip der Bauteilstruktur aus der Kombination von Werkstoffeigenschaften enthält.



**Bild 8:** Lösungsfelder bei elastischer und teilplastischer Verformung infolge unterschiedlicher Belastungskombinationen aus Biege- und Zug/Druckbeanspruchung (z.B. bei Laschenverbindungen oder beim krummen Balken). IEaE = innen und außen elastisch, iZaE = innen teilplastischer Zug und außen elastisch, iDaE = innen teilplastischer Druck und außen elastisch, iDaD = innen und außen teilplastischer Druck usw.; 0P = keine plastische Verformung, 1P = plastische Verformung auf einer Biege-seite, 2P = plastische Verformung im Zug- und Druckspannungsbereich der Biege-zonen). Pkt.1: Grenze des elastischen Bereichs; Pkt. 2: Fließgelenk (Durchplastizieren) bei einer gegebenen Kombination von Zug und Biegung /8, 9/

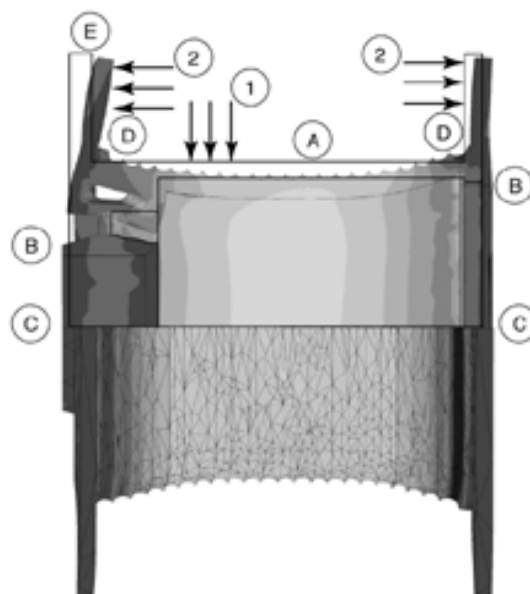


**Bild 9:** Spannungs-Dehnungsdiagramm des quasistatischen Druckversuchs für den Trommelwerkstoff GGG 40.3. Eingetragen ist der Vorgang des "Einfahrens" der Trommel infolge erstmaliger Belastung (a) und b)) und der dadurch vergrößerte elastische Bereich für die nachfolgenden Belastungen (c)).

teraktion von Beanspruchungsverteilung und Werkstoffverhalten führt am Beispiel einer solchen Bolzen-Lasche-Verbindung zu Beanspruchungsfeldern, die das Ausmaß einer Tragfähigkeitssteigerung durch Verwendung einer „Kombination aus zwei Werkstoffen“ – einer mit ideal-elastischem und einer mit ideal-plastischem Verhalten - aufzeigt, wenn die durch die Biegebeanspruchung erzeugte Verteilung der Spannungen einen solchen Ausgleich erlaubt (**Bild 8**).

Ein weiteres Beispiel soll diese Aussage der Leistungssteigerung stützen und zugleich auf eine Verlagerung der kritischen Lastfälle hinweisen: Seiltrommeln erfahren durch die Seilumschnürung eine Druckbeanspruchung des Trommelmantels in Umfangsrichtung, bei überelastischer Beanspruchung versprechen die Werkstoffangaben eine Verdoppelung der Belastungsfähigkeit (**Bild 9**) in diesem Bereich – in der Praxis werden durch sogenannte „Einfahrversuche“ in den überelastischen Bereich Seiltrommeln vorverformt und damit für höhere Belastungen „trainiert“. Im Unterschied zum vorherigen Fall wird dabei durch den elastoplastischen Erstbelastungsvorgang die Eigenschaft „Spannungs-Dehnungsverhalten“ so verändert, dass die nachfolgenden betrieblichen Belastungsvorgänge auf ein linear-elastisches Dehnungsverhalten stoßen, bei dem lediglich die Streckgrenze durch Verfestigungsvorgänge höher gesetzt wurde. Dieser Trainiervorgang ruft aber irreversible Verformungen hervor, die Betriebsbelastungen stoßen auf eine geometrisch veränderte Form des Bauteils. Die Festigkeitsgrenze des Trommelmantels wird soweit hinaufgeschoben (**Bild 10**, Pos A), dass die Auslegung der Trommeln heute völlig andere Schadensfälle berücksichtigen muß:

- Schiefstellungen infolge der plastischen Verformungen führen zu Lagerschäden oder verursachen Eingriffsstörungen im Antriebsstrang (**Bild 10**, Pos. B),



**Bild 10:** Seiltrommel, Beanspruchungs- und Verformungsverhalten anhand einer FE-Rechnung. Problemzonen: A Trommelmantel; B Lagerbereich infolge Radialverformung und Schiefstellung; C Einbaubegrenzung in axialer Richtung; D Kerbwirkungen im Bereich der Bordscheibenanschlüsse; E Endscheibenverformung bei mehrlagiger Bewicklung



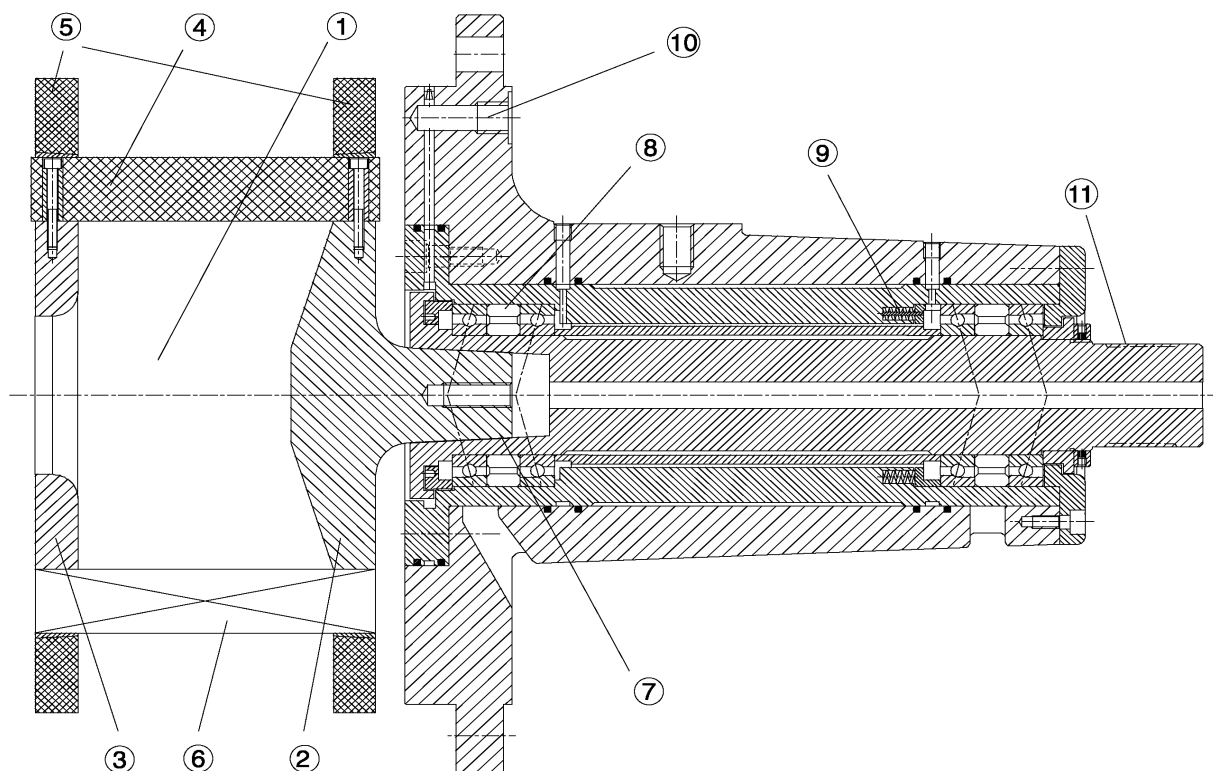
- plastische Axialverformungen der Trommel tragen zu Störungen in der Lagerung bei (**Bild 10**, Pos. C),
- der Übergang der plastischen zur elastischen Verformung im Bereich der Bordscheibenanschlüsse führt zu Vorspannungen und damit zur Vergrößerung der Kerbwirkung (**Bild 10**, Pos. D).
- der Bereich der Endscheiben kann unzulässige Verformungen aufweisen, die den Bauraum überschreiten. Im Fall der Schiefstellung von Bremscheiben wird die Bremsfunktion beeinträchtigt (**Bild 10**, Pos. E).

Bezüglich der in der Einleitung genannten Thesen besteht sicherlich kein Zweifel, dass allein die Eigenschaftsveränderung eines an sich bekannten Werkstoffes zu der im Vordergrund stehenden Tragfähigkeitserhöhung führt. Während im Fall der Bolzen-Laschen-Verbindung die Tragfähigkeitssteigerung aufgrund des geänderten Werkstoffverhaltens ohne weitere Folgen für die Funktionsfähigkeit vonstatten ging, weist die Seiltrommel dagegen Funktionsmängel auf, die auf das Auftreten plastischer Verformungen zurückzuführen sind und die dadurch die Anwendbarkeit dieser „Werkstoffkombination“ nach neu zu berücksichtigenden Versagenkriterien begrenzen.

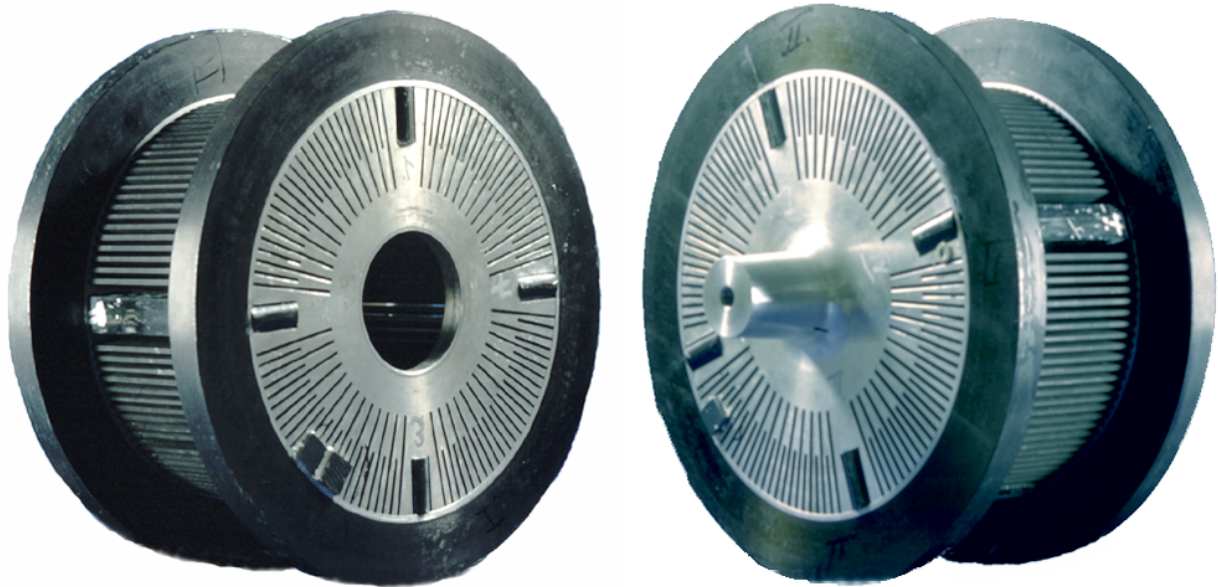
### 3 Kombination von Faserverbunden und Metall bei der Gestaltung eines Hochgeschwindigkeits-Windsichters

Das folgende Beispiel aus der Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen soll verdeutlichen, wie die verfahrenstechnische Forderung hoher Prozeßgeschwindigkeiten zur Bauform eines Rotors führt, der nur durch die Kombination von Bauteilen aus unterschiedlichen Funktionswerkstoffen realisiert werden kann:

Aus der Optimierung eines mechanischen Klassierprozesses mit der Forderung nach einer Trenngrenze von 1 µm Partikeldurchmesser ergab sich die Konstruktion eines Rotors für einen Abweiseradsichter, der an der verfahrenstechnischen Wirkfläche eine Umfangsgeschwindigkeit von mindestens 250 m/s bietet. Die in der Anforderungsliste hervorstechende Eigenschaft besteht damit in der Gewährleistung von Festigkeit und Steifigkeit gegenüber hohen Fliehbelastungen. Die konsequente Anwendung von Leichtbauprinzipien zur Erreichung hoher Umfangsgeschwindigkeiten führt zur Anwendung von Hybridbauweisen unter Verwendung von Faserverbundwerkstoffen, um damit gezielt die Eigenschaften der Maschine bezüglich Tragfähigkeit, Verformung und dynamischem Verhalten einstellen zu können. Es wurde daher ein Versuchsrotor entwickelt, bei dem die verfahrenstechnischen Ele-



**Bild 11:** Aufbau eines einseitig gelagerten Abweiseradsichters in Hybridkonstruktion für Umfangsgeschwindigkeiten bis 300 m/s /10, 11/



**Bild 12:** Einseitig gelagerter Hybridrotor in zwei Ansichten

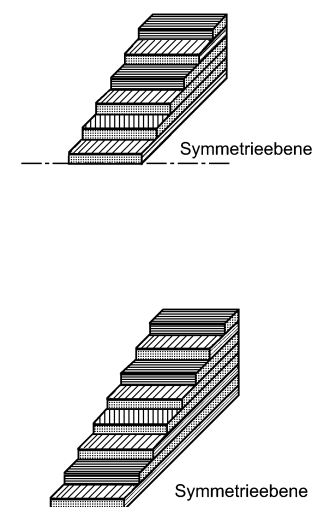
mente aus Verbundwerkstoff, die Tragstruktur als Kombination von Aluminiumscheiben (wegen der Welle-Nabe-Verbindung) und Tragringen aus Faserverbundstoff gefertigt sind. Der in **Bild 11** und **Bild 12** dargestellte Hybridsichter (1) besteht aus der Antriebsscheibe (2), der getriebenen Scheibe mit dem Feingutauslass (3), vier Haltestäben (4) zur Drehmomentübertragung auf die getriebene Scheibe, den über Kegelpressverbindungen befestigten Faserverbundringen (5) zur Dehnungsbehinderung und Aufnahme der Fliehkräfte und den Lamellen als Strömungsleitelemente (6).

Auf einige der Elemente und ihre Auslegung sei hier besonders eingegangen, da an diesem Beispiel besonders die Interaktion von konstruktiver Gestaltung, Werkstoffauswahl und Fertigungstechnik demonstriert werden soll.

Die Lamellen (6) stellen den mechanischen Fall beidseitig eingespannter Träger dar, bei denen die Belastung durch Fliehkraft dominiert – maßgebende Größen sind also die Eigenmasse der Lamellen, die Einspannlänge, die Lamellenhöhe und die Querschnittsgrößen gegenüber Biegung und Verdrehung. Im vorliegenden Fall der Leichtbaukon-

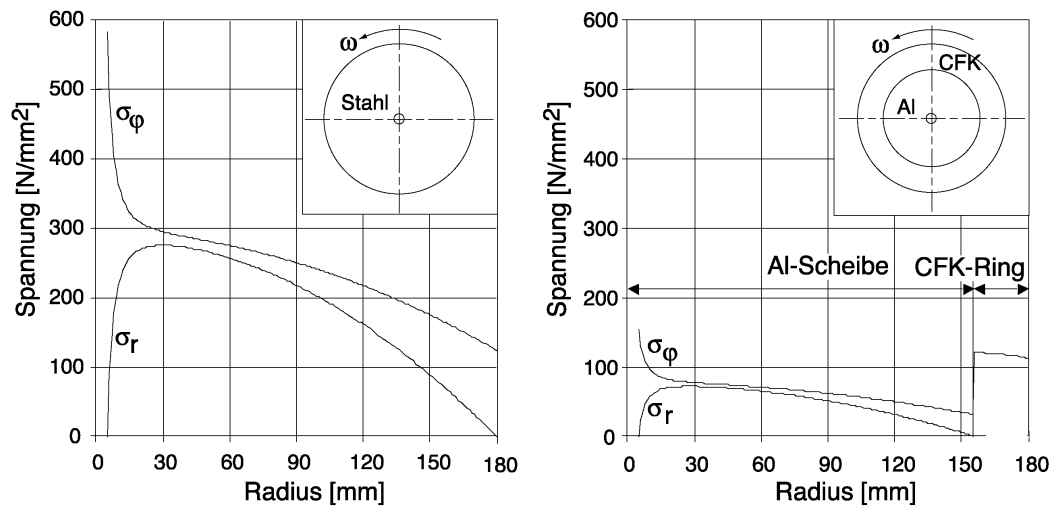
struktion mit Faserverbundwerkstoffen wird ein Aufbau von Prepregs im Tape-Lying-Verfahren vorgeschlagen. Da eine übliche unidirektionale Prepregschicht eine Dicke von etwa 0,25 mm aufweist, sind für den Aufbau einer Lamelle von 3 bis 4 mm Dicke 12 bis 16 Schichten Kohlenstofffaser HT realisierbar.

Die Steifigkeit einer unidirektionalen Schicht ist abhängig von dem Faserorientierungswinkel und besteht in ihrer mathematischen Formulierung aus Dehnsteifigkeiten, Biegesteifigkeiten und Koppelsteifigkeiten. Damit ist grundsätzlich eine Optimierung der Struktur



12 Lagen	Schrittweite	Kombination
ohne Symmetriebetrachtung	15°	117649
	5°	47 Mio.
mit Symmetriebetrachtung	15°	4096
	10°	46656
	5°	1 Mio.
16 Lagen	Schrittweite	Kombination
ohne Symmetriebetrachtung	15°	5 Mio
	5°	1,6 Mrd.
mit Symmetriebetrachtung	15°	65536
	5°	100 Mio.

**Bild 13:** Kombinationsmöglichkeiten eines Lagenaufbaus für Windsichterlamellen aus Prepregs für verschiedene Lagenzahlen und Schrittweiten der Faserorientierungswinkel /10/



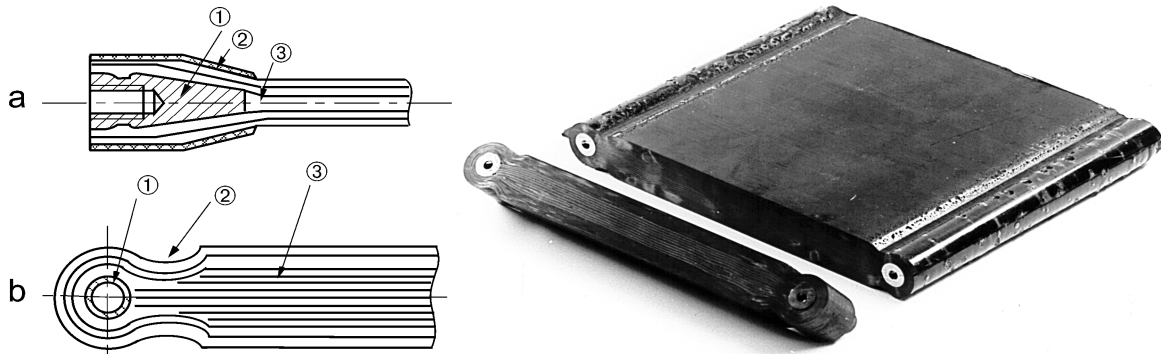
**Bild 14:** Spannungsverlauf in den Scheiben des Hochgeschwindigkeitswindsichters bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 300 m/s (Links: Stahlscheibe; rechts: Aluminiumscheibe mit Faserverbundring) /10/

durch das Aufeinanderschichten von unidirektionalen Prepregs unter Ausrichtung der Fasern gemäß den Schnittgrößen der Bauteile möglich, wobei zu beachten ist, dass sowohl durch die Anzahl der Prepregschichten als auch durch die Anzahl der zu optimierenden Steifigkeitsgrößen eine Vielzahl von Parametern und deren Kombinationen die zu optimierenden Eigenschaften bestimmen. Die Gesamtwirkung der aus 16 Schichten aufgebauten Lamelle ist einer Bewertung zu unterwerfen, die von den Anforderungen an den Sichterrotor abgeleitet wird. **Bild 13** vermittelt einen Eindruck über die für eine Optimierung durchzurechnende Zahl von Kombinationen, abhängig von der Zahl der Prepregs und der Schrittweite bei der Variation des Faserrichtungswinkels jeder einzelnen Schicht. Die Darstellung soll aber auch die Verantwortung des Konstrukteurs für die „Werkstoffgestaltung“ aufzeigen und betonen, dass eine solch gezielte Entwicklung des Bauteils Lamelle nur möglich ist, wenn die Belastungen und Einsatzbedingungen im Detail bekannt sind. Allgemeine Regeln zur inneren Gestaltung von Windsichterlamellen sind aus diesen Betrachtungen nicht ableitbar.

Die Gestaltung und Auslegung der Rotorscheiben und -ringe (Teile (2), (3) und (5) in Bild 11) wird in hohem Maße beeinflusst durch Elastizitätsmodul, Dichte, Verformung und Festigkeit des Scheibenwerkstoffs. Nach dem konstruktionsmethodischen Prinzip der Aufgabentrennung wurde im vorliegenden Fall die Mitnahmefunktion der Lamellen und Haltestäbe durch eine Metallscheibe vorgenommen, die Aufnahme der Fliehbeanspruchungen geschieht über einen aufgesetzten Ring, der infolge

Ausdehnungsbehinderung am äußeren Rand der rotierenden Scheibe die Fliehspannungen in dieser Scheibe verringert. Der äußere Ring sollte daher aus einem Werkstoff mit geringer Dichte, hohem Elastizitätsmodul und hoher Festigkeit bestehen, der Faserverbundwerkstoff (CFK-HM) besitzt unter den untersuchten Werkstoffen hierfür die besten Eigenschaften. **Bild 14** zeigt die enormen Beanspruchungsunterschiede gegenüber einer umlaufenden Stahlscheibe an einem Berechnungsbeispiel.

Das Beispiel des Haltestabes (Teil 4 in Bild 11) soll die Anforderungen herausstellen, die die Verwendung unkonventioneller Werkstoffe an die Detailgestaltung und damit an den Konstrukteur stellt. Bei isotropen Werkstoffen sind durch Überlagerung der Schnittgrößen die Beanspruchungen und Verformungen aus den Grundgleichungen der Festigkeitslehre bestimmbar, wobei die Verbindungsstelle (Schrauben, Schweißen) einer besonderen Betrachtung auch bezüglich der Kerbwirkung bedarf. Beim Aufbau der Haltestäbe aus Faserverbundwerkstoffen ist für den Aufbau und die Berechnung die gleiche Vorgehensweise wie bei den Lamellen zu wählen, es besteht aber das Problem der für Faserverbundwerkstoffe typischen Verbindungstechnik. **Bild 15** zeigt anhand zweier Lösungsmöglichkeiten, dass zwischen einem eingelagerten Anschlusselement (1) und dem eigentlich tragenden Element (3) durch angepasste Bewicklungstechniken oder spezielle Formgebungen während des Aushärtvorgangs (2) kraftflussgerechte Bauteilstrukturen geschaffen werden müssen, die sich erheblich von den Konstruktionen mit isotropen



**Bild 15:** Prinzipdarstellungen für die konstruktive Gestaltung des Haltestabes. A: Gewickelter Haltestab mit Gewindeanschlußstück; b: Prepreg- und Wickelkonstruktion; c: Ausgeführte Form mit eingewickeltem Verbindungsstück nach b. /10/

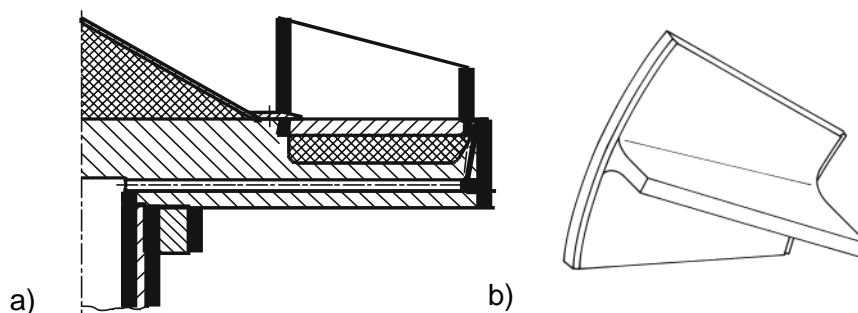
Werkstoffen unterscheiden. Für den Versuchsrotor wurde ein in den Lamellenbereich integrierter rechteckiger Haltestab gemäß **Bild 15b** entwickelt, **Bild 15c** zeigt den in einem Wickelwerkzeug um die Hülsen vorgefertigten und anschließend in einem Presswerkzeug auf Kontur gebrachten Rohling zur Herstellung der Haltestäbe; deutlich ist der Aufbau aus den eingelegten Prepregs und die Umwicklung zur kraftflussgerechten Übernahme der Schnittgrößen an den Stabenden zu erkennen. Zur Übertragung in die Scheiben wurde in diese ein formangepasstes Gegenstück eingebracht.

Das vorgetragene Beispiel macht meines Erachtens besonders deutlich, dass die Optimierung einer Bauteilstruktur mit speziellen und erhöhten Anforderungen durch die Verwendung von konstruktiven Hauptanforderungen besonders begünstigten Werkstoffen möglich ist, aber die detaillierte Ausgestaltung nur in der Zusammenarbeit zwischen Werkstofffachmann, Fertigungstechniker und Konstrukteur erfolgen kann. Die gute Trennbarkeit der Forderungen in der Anforderungsliste des Windsichters gestattete im vorliegenden Fall eine Optimierung der Konstruktion durch gezielten Einsatz von Werkstoffeigenschaften. Der in der Einleitung angedeutete „Pferdefuß“ dieser Konstruktion bestand in einer Eigenschaft des Sichtprozesses, der zum Entwicklungszeitraum so nicht absehbar

war: Technische Pulver enthalten immer einen gewissen Anteil an Grobkornpartikeln, die der Strömungsform des Sichters bei den vorgesehenen Geschwindigkeiten nicht folgen und unter Bildung von Sekundärwirbeln Lamellenverschleiß verursachen. Für eine industriell erfolgreiche Lösung dieser Windsichterkonstruktion ist die Entwicklung einer Schutzschicht gegen Abrasivverschleiß notwendig.

#### 4 Entwicklung keramischer Ventilatoren für die Umwälzung heißer Gase bis 1350°C

Hochtemperaturprozesse mit Prozesstemperaturen über 1000 °C spielen in der Verfahrenstechnik im Hinblick auf den Energieaufwand eine wichtige Rolle. Dabei dienen Einrichtungen zur Gasförderung dazu, heiße Gase an den gewünschten Ort zu bringen bzw. umzuwälzen. Geräte zur Heißgasförderung sind deshalb wünschenswert, weil sich mit ihnen die Prozessführung gezielt verbessern lässt, d.h. dass sich Temperaturfelder vergleichmäßigen, Schadstoffemissionen reduzieren und der Energieeinsatz optimieren lassen usw.. Es sollte deshalb ein Ventilator entwickelt und erprobt werden, der für Gastemperaturen bis 1350 °C einsetzbar ist. Dieses Ziel ist durch einfache Weiterentwicklung der bekannten Stahlventilatoren (max. bis 800° bzw. kurzzeitig bis 1000°C einsetzbar) nicht zu errei-



**Bild 16:** a) Versuchsaufbau aus Stahlrad und Keramikschaufeln; b) Keramikschaufeln /11, 12/

chen. Bemühungen um eine Konstruktion aus hochtemperaturbeständigen Nickel-Legierungen, die als Werkstoff für (gekühlte) Schaufeln von Gasturbinen Verwendung finden, mussten wegen der enormen Werkstoff- und Fertigungskosten aufgegeben werden. Die zwischenzeitlich entwickelten ODS-Legierungen (Oxid-Dispersionsverfestigte Superlegierungen) könnten eventuell in der Zukunft als Alternative zu keramischen Werkstoffen neue Lösungsansätze bieten, wenn in ihrer Entwicklung ausreichende Korrosionsbeständigkeit erreicht wird.

Als Lösung wird eine Konstruktion mit hochtemperaturfester Keramik gesehen. Keramische Werkstoffe sind im Maschinenbau bisher unüblich und den meisten Konstrukteuren deshalb wenig vertraut. Dies gilt für die Werkstoffauswahl als auch für die fertigungsgerechte, beanspruchungsgerechte und betriebsgerechte Gestaltung. Für die hier benötigten Bauteilgeometrien kommt praktisch nur der Schlickerguss infrage, der zu einer Gestaltung ähnlich Graugussteilen führt, also Konstruktionen mit angemessenen Aushebeschrägen und ohne Hinterschneidungen. Der anschließende Brennprozess bedingt eine Gestaltung ohne merkliche Querschnittsänderungen und mit begrenzten Wandstärken. Wie sich im Laufe der Entwicklung zeigte, besteht bei flächigen Strukturen, z.B. Scheiben, die Gefahr eines Verziehens beim Brennen. Es zeigte sich, dass SiSiC (Silizium-infiltriertes Silizium-Carbid) erste Wahl für die geplante Anwendung ist, weil dieser Werkstoff eine hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist und die Herstellung großer Bauteile gestattet.

Es wurden eine Reihe von konstruktiven Lösungen erarbeitet, gebaut und in einer halbindustriellen Versuchsanlage, die Temperaturen bis zu 1400 °C erlaubt, getestet. Die folgenden Darstellungen sollen zeigen, wie in der Zusammenarbeit zwischen Maschinenbaukonstrukteur und ausführendem

Unternehmen der Keramikbranche schrittweise eine Struktur entwickelt wurde, die den besonderen Anforderungen beim Einsatz eines solchen Heißgaslüfters gerecht wird.

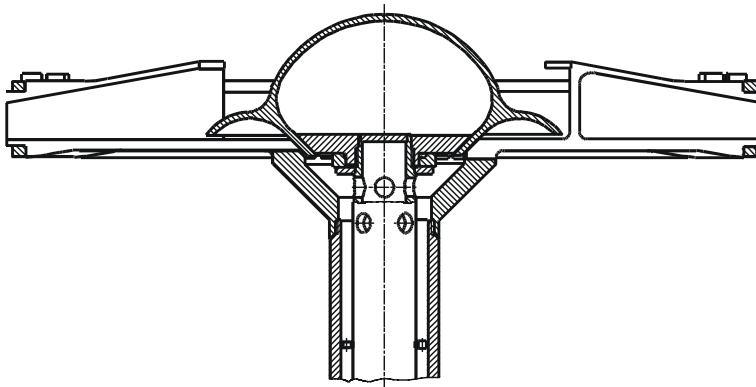
Zum Test einzelner Schaufeln unterschiedlicher Geometrie und aus unterschiedlichen Werkstoffen wurde ein Versuchsrad aus Stahl konstruiert und gebaut (**Bild 16a**), in das die einzelnen Keramik-Schaukeln, bestehend aus tortenstück-artiger Fußplatte und Schaufelblatt (**Bild 16b**), eingehängt wurden. Durch Aneinanderfügen mehrerer Schaufeln entstand ein vollständiger Schaufelkranz. Ein solcher modularer Aufbau erschien deshalb besonders günstig, weil das Versagensrisiko beim Einsatz von Einzelschaukeln mit begrenzten Abmessungen deutlich geringer als mit monolithischen Rädern eingeschätzt wurde.

Versuche in der erwähnten Ofenanlage zeigten rasch die Grenzen des Konzepts:

- Die Stahlrückenscheibe war mit Kühlluftkanälen versehen. Der zum Schutz des Rades notwendige Kühlluftstrom betrug bis 10 % des Förderstroms und führte zu einer starken Abkühlung der Prozessgase.
- Eine Temperatur über 1000 °C war nicht zu verwirklichen, weil die Temperatur der Stahlrückenscheibe um nicht mehr als 200 K gegenüber der Prozesstemperatur abgesenkt werden konnte (Grenztemperatur 800 °C).
- Unter der Wirkung der Fliehkraft und der Erwärmung waren Gleitbewegungen zwischen den Schaufelfußteilen unvermeidlich. Dazu mussten alle Gleitflächen geschliffen werden. Dennoch entstanden durch örtliche Gleitbehinderung Unwuchten.

Ferner zeigte sich, dass Schaufeln aus reaktionsgebundenem Silizium-Nitrid (RBSN) infolge der geringen Wärmeleitung eine starke Isolierung gegen die Stahlscheibe bewirken. Die daraus resultierenden starken Temperaturgradienten verursachten aber kritische Wärmespannungen. Das Konzept einer gekühlten Stahl-Tragekonstruktion mit einem keramischen Wärmeschutz wurde danach aufgegeben.

**Bild 17** zeigt eine weitere modulare Lösung mit einzelnen SiSiC-Schaufelelement-



**Bild 17:** Modulare Lösung des Heißgasventilators mit einzelnen SiSiC-Schaufelelementen /11, 12/



en (Fußplatte, Schaufel und Deckscheibenabschnitt), die in zwei SiC-armierte CFC-Ringe (Carbon fibre reinforced carbon) als die Fliehkraftbeanspruchung aufnehmende Elemente eingehängt wurden. Unwuchtprobleme und die geringe Beständigkeit der Schutzschicht für die CFC-Ringe zwangen dazu, dieses Konzept nicht weiter zu verfolgen.

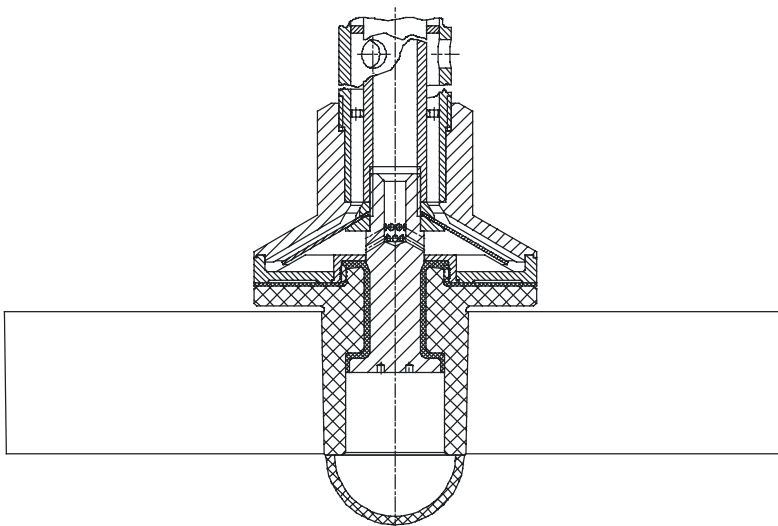
Ein wesentliches Problem von Stahl-Heißgaslüftern ist der Wärmefluss über die Welle aus dem Heißgasraum in die Umgebung. Man sollte daher Lösungen anstreben, bei denen es gelingt, den Wärmefluss aus dem Ofenraum heraus zu begrenzen. Damit ergibt sich als konstruktives Kernproblem die Gestaltung des Übergangs warm-kalt und des Übergangs Stahl-Keramik, also einmal die Schaffung einer Wärmesperre und zum anderen eine geeignete Welle-Nabe-Verbindung zwischen Stahlwelle und Keramikrad. Eine konstruktionssystematische Untersuchung zu den Welle-Nabe-Verbindungen ergab, dass wegen der Kerbempfindlichkeit keramischer Werkstoffe und wegen der höheren Wärmeausdehnungskoeffizienten von Stahl im Vergleich mit Keramik formschlüssige Verbindungen nicht in Frage kamen. So wurde eine Konstruktion angestrebt, bei der das Rad ungekühlt der Gastemperatur ausgesetzt wird und der zu kühlende Bereich möglichst aus dem Ofenraum verlagert werden sollte.

Erste Lösungen in dieser Richtung mit einem Si-SiC-Scheibenring mit aufgarnierten rein radial verlaufenden Schaufeln führte zu Unwuchten durch Verzug der Keramikstruktur. Nachdem Strömungsversuche gezeigt hatten, dass mit rein radial verlaufenden Schaufeln konstanter Breite auch bei Verzicht auf Deck- und Rückenscheibe ein befriedi-

gendes Förderverhalten zu erreichen ist, wurde ein so genanntes „Paddelrad“ (**Bild 18**) entworfen. Zur Abstützung des Rades diente ein an den Radkörper angarnierter großer Flansch, zur Zentrierung ein  $ZrO_2$ -Ring, dessen Wärmeausdehnungskoeffizient zwischen dem von SiSiC und Stahl liegt. Der Verzicht auf Deck- und Rückenscheibe und der Spalt zwischen angarniertem Flansch und Rad bringt eine Steigerung der Temperaturwechselbeständigkeit, da sich die langen schlanken Flügel ungehindert ausdehnen können. Durch Verzicht auf eine Schaufelkrümmung treten nur geringe „Fliehkraftnormalspannungen“ und wegen der geringen Dichte des Fluids keine Biegebeanspruchungen auf. Auch dieses Rad wies wie folgt immer noch einige Mängel auf, obwohl ein mehrstündiger Betrieb bei  $1300^\circ C$  durchgeführt werden konnte:

- Die Wärmeabfuhr durch den angarnierten Rückenflansch war zu hoch. Dadurch entstanden unzulässig hohe Wärmespannungen im Bereich der Garnierung.
- Der Radkörper war scharfkantig, was besonders an den Schaufelkanten beim An- und Abfahren zu kritischen Wärmespannungen führt.
- Das eingesetzte keramische Isolierpapier setzte sich im Verlauf des Betriebs und büßte dabei einen Teil seiner Wärmesperrfunktion ein. Die Elastizität des faserigen Materials bewirkte einen dynamisch unbefriedigenden Lauf.
- Kriechen der Metallteile der Nabe als Folge unzureichender Kühlung führte zum Klemmen nach der Abkühlung und behinderte die Demontage.
- Um hohe Grünfestigkeit zu erzielen, wurde ein selbstaushärtender Schlicker verwendet, dessen Festigkeitsstreuung zu groß war (Weibull-Modul  $< 6$ ), um eine ausreichend geringe Ausfallwahrscheinlichkeit zu sichern.

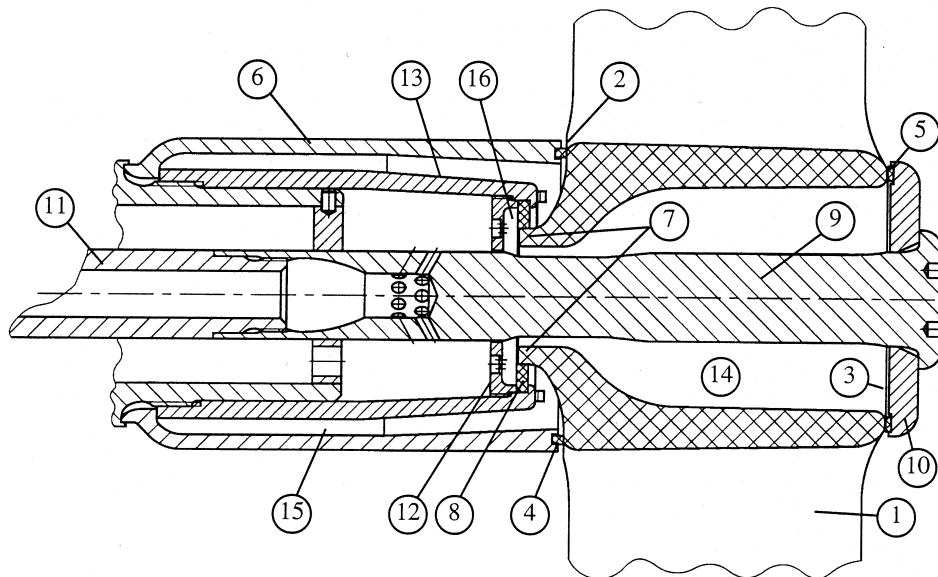
Die Erfahrungen mit diesem Rad wurden bei der Gestaltung der abschließenden Konstruktionsform genutzt: Das Rad läuft hängend, d.h. mit vertikaler Achsanordnung in einem Gehäuse mit Feuerfestausmauerung. Ein über Frequenzwandler in der Drehzahl verstellbarer Motor treibt über einen Keilriementrieb die Antriebswelle an. Dadurch entstehen eindeutige Lagerlasten für die zwei Standard-



**Bild 18:** Paddelrad /11, 12/

Stehlager, die mechanische Belastung des eigentlichen Rades im stationären Betrieb ist rein ruhend. Zur Verbindung von Rad und Welle wurde ein kraftschlüssiges System entwickelt (**Bild 19**), bei dem die Hohlwelle (11) als Zuganker benutzt wird. Am antriebsseitigen kalten Wellenende befindet sich ein Tellerfederpaket, das eine Vorspannkraft auch

Das Drehmoment wird über die ODS-Hülse (6) und Ring (4) sowie Zuganker (9), Scheibe (10) und Ring (5) in das Rad übertragen. Die Zentrierung erfolgt keramikseitig über den am Zentrierabsatz des Rades angeschliffenen Absatz (7) mit kleinem Durchmesser, so dass bei Erwärmung nur kleine Durchmesserunterschiede erzeugt werden. Der Zentrierab-



**Bild 19:** Abschließende Ausführung des Paddelrades, insbesondere der Welle-Nabe-Verbindung zwischen Stahlwelle und SiSiC-Lüfter /11, 12/

bei unterschiedlichen wärmebedingten Dehnungen sicherstellt. Eine Anordnung im Heißbereich scheidet aus, weil dort die Federn durch Kriechen rasch ihre Vorspannkraft verlieren würden. Im Heißgasbereich wird als Zuganker ein Zylinder aus ODS (9) verwendet. Das Laufrad (1) wird über die Flächen (2) und (3) ausgerichtet. Diese Kippabstützung bleibt auch bei unterschiedlichen Dehnungen der Stützelemente erhalten, weil die Teile aufeinander gleiten können. Die Flächen am Lüfterrad sind wegen der recht hohen Druckvorspannung für die Radbefestigung geschliffen, um örtliche Spannungsüberhöhungen so klein wie möglich zu halten. In früheren Versuchen war festgestellt worden, dass bei einem direkten Kontakt zwischen SiSiC-Keramik- und Metallbauteilen durch Diffusion Verschweißungen auftraten. Um dies zu verhindern und damit eine einfache Demontage zu ermöglichen, werden Aluminiumoxid-Ringe eingelegt (4 und 8). Sie sorgen für einen Ausgleich radialer Dehnungsunterschiede. Es zeigte sich, dass die Ringe im Betrieb in Segmente zerbrechen. Ihre Funktion wird dadurch nicht beeinträchtigt, weil sie unverlierbar in Führungsnuten liegen.

satz wird durch 4 Zirkonoxidsegmente umschlossen, die zum einen als Wärmesperre wirken, zum anderen wegen ihres Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen dem von SiSiC und Stahl die Dehnungsunterschiede bei Erwärmung aufteilen. Die Segmentierung dient dazu, Zugspannungen im Ring (8) zu vermeiden. Dieser Gestaltung lag die Beobachtung zugrunde, dass bei thermisch beanspruchten ringförmigen Bauteilen wie z.B. Brennersteinen nach einer Entlastung durch rein radial verlaufende Durchrisse über lange Betriebsdauern keine weiteren Risse auftreten. Durch das Innenrohr (11) wird Druckluft zur Kühlung gegen die Metallplatte (12) und das Rohrstück (13) geblasen. Dadurch wird die radiale Dehnung des Rohrstücks (13) reduziert und die Zentrierwirkung verbessert. Die Zentrierung war trotz wärmebedingter Spielzunahme so wirkungsvoll, dass keine merklichen Unwuchten auftraten. Die erwärmte Kühlluft wird durch das Außenrohr abgeführt. Die Hohlräume (14,15,16) sind zur Wärmeisolation mit einem keramischen Fasermaterial ausgelegt. Es wurde eine Kühlluftmenge von  $10 \text{ m}^3(\text{i.N.})/\text{h}$  (Ansaugzustand) verwendet, was im Vergleich zum Fördervolumenstrom um  $500 \text{ m}^3(\text{i.N.})/\text{h}$  vernachlässigbar ist.

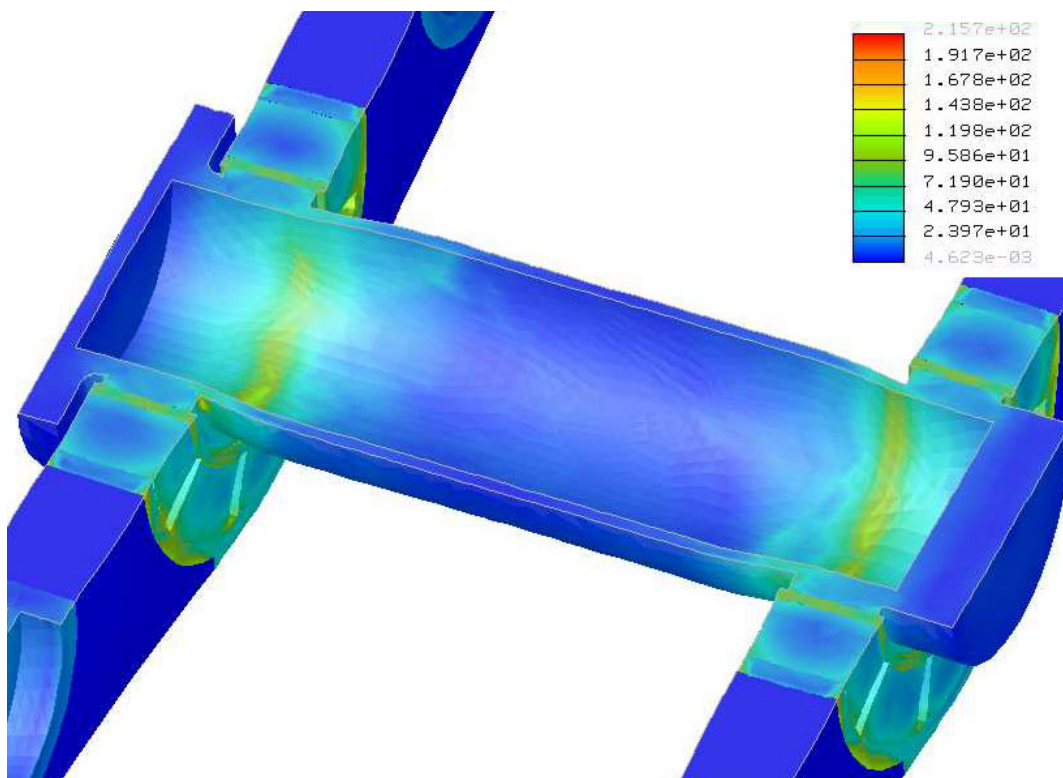
Die etwas ausführliche Beschreibung des Werdeganges dieser Keramik-Metallkonstruktion soll neben dem positiven Effekt der Problemlösung besonders aufzeigen, welcher Informationsbedarf zwischen Maschinenbau, Werkstoffkunde, Fertigungstechnik und Verfahrenstechnik notwendig ist, um eine der verfahrenstechnischen Aufgabenstellung entsprechende Maschinenbaulösung zu schaffen. Eines der schwierigsten Probleme war der für den Konstrukteur ungewohnte Umgang mit den Eigenschaften des Werkstoffes Keramik: Wärmeausdehnung, Wärmeleitung, Festigkeitsverhalten (Spröbruchverhalten, statistische Kennwerte nach der Weibull-Verteilung), Reibung usw. Für das mitarbeitende Unternehmen aus der Keramikbranche waren Begriffe wie Kraftfluß, Kerbwirkung, Mehrachsigkeit der Spannungszustände zu verinnerlichen und in die Fertigungsprozesse umzusetzen.

Entsprechend den Thesen der Einleitung mußten zwei Negativverfahren bei der Umsetzung dieser Konstruktion in die industrielle Anwendung gemacht werden: Das Vertrauen in den Werkstoff Keramik bezüglich seiner Dauerfestigkeit ist so gering, dass eine Umsetzung in der verfahrenstechnischen Industrie nicht erfolgte, weil bei einem potentiellen Bruch eines Ventilators die Bruchstücke eine ganze Charge des verfahrenstechnischen Produkts zerstören würde.

Der andere „Pferdefuß“ war die Wirtschaftlichkeit: Die Keramikindustrie geht von Produktionsmengen vorstellungen aus, die sich mit der Entwicklung eines High-Tech-Produktes besonderer Anwendung und hohen Qualitätsanforderungen nicht decken.

## 5 Entwicklung einer Reaktionsschwingmühle

Mit dem folgenden Beispiel soll neben der problemangepaßten Lösung auch gezeigt werden, wie die Kombination von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen in einem Baukastensystem zur Erfüllung von Anforderungen genutzt werden kann. Grundlage ist die Entwicklung eines verfahrenstechnischen Prozesses zur simultanen Zerkleinerung und Umsetzung von Feststoffreaktionen /11, 13, 14/. Im Mittelpunkt dieses Prozesses steht eine Schwingmühle mit integriertem Reaktor, die unter hoher Beschleunigung von mehr als 60 g steht und bei der – abhängig von der durchzuführenden Reaktion – Prozeßtemperaturen bis zu 400°C auftreten können. Die außerordentlich erfolgreichen Grundlagenuntersuchungen /11/ an einer in Stahl ausgeführten Mühlenkonstruktion führten zu dem Ergebnis, dass eine Überarbeitung der Mühlenstruktur hinsichtlich der Beanspruchungen unter Beschleunigung, der thermischen Stabilität und der Angleichung der Mahlbehälter an die durchzufüh-



**Bild 20:** 3-D Modell des Reaktionsbehälters und der Mühlenstruktur mit unterschiedlichen Werkstoffen /15/



rende Reaktion zu einem Baukastensystem führt, das den jeweiligen prozeßbedingten Anforderungen angepaßt werden kann (Forderungen wie: Einsatz bei aggressiven Gasen wie HCl, Chlorsilane; kontinuierliche Zu- und Abfuhr von Gas und Reaktionsgut; Wärme- und Luftisolation usw.). Von den unterschiedlichen Lösungen werden bei der vorliegenden Betrachtung die Leichtbaukonzepte besonders herausgestellt:

Betrachtet man die Einsatzbedingungen der Reaktionsschwingmühle differenzierter, so stellt man fest, dass das Gewicht eine zentrale Stellung einnimmt, die direkt auf die Kosten und die Systemfunktionen wirkt. Die geforderte Beschleunigung von mindestens 60g bei niedriger Drehzahl ist nur mit einer großen Amplitude zu realisieren, auf die wiederum die Massenzusammensetzung einen großen Einfluß hat. Damit erscheint es aus funktionalen und ökonomischen Gründen zweckmäßig, das Gewicht zu reduzieren, ohne die Tragfähigkeit, Steifigkeit oder andere Funktionen der Konstruktion zu schmälern.

Um die Gesamtmasse der Reaktionsmühle zu verringern, wird eine Traverse in Verbundbauweise entwickelt, die aus einem kohlefaserverstärkten Kunststoff die Verbindung zwischen dem Mahlbehälter und den Unwuchtwellen gewährleistet (**Bild 20**). Diese Verbindung muß möglichst steif sein und eine Demontage des Mahlbehälters ermöglichen. Weiterhin muß das zu konstruierende Bauteil die Elemente für die Unwuchtlagerung und der Federelemente aufnehmen können bzw. beinhalten.

Bei der Auswahl der Matrixsysteme wird ersichtlich, dass es nur ein Harzsystem gibt, das für Temperaturen bis maximal 270°C anwendbar ist. Die Bismaleinimidharze, die eine so hohe Wärmebeständigkeit aufweisen, erfordern jedoch einen sehr hohen verfahrenstechnischen Aufwand, so daß diese nicht zur Anwendung kommen konnten. Eine gute Alternative stellt jedoch das für die RTM-Technik geeignete und wärmebeständige Epoxidharz EPOLAM 2080 von der Firma Axson mit einer Glasübergangstemperatur von 190°C dar.

Als Fasermaterial kommt für die Anwendung nur eine Carbonfaser des Typs HTA in Frage, da diese Fasern als einzige eine genügende Steifigkeit aufweisen und bis 500°C wärmebeständig sind. Die Fasern werden als Gewebe in Körperbindung verwendet, da sich diese besonders gut für ein sphärisch gekrümmtes Bauteil eignen.

Die im Vergleich zur Mahlbehältertemperatur von 250°C relativ niedrige Wärmebeständigkeit des Matrixwerkstoffes und des Faser-Kernwerkstoffes führt dazu, dass die Trägerstruktur durch eine Wärmeisolierung vom Mahlbehälter getrennt werden muß. Für die Wärmeisolierung wird Zirkonoxid verwendet, da durch das Keramikelement eine steife Anbindung der Trägerstruktur an den Mahlbehälter und eine relative geringe Wärmeleitung gewährleistet wird. Der Behälter selbst besteht aus einer dünnen Metalltragschale, in die Keramikeinsätze so eingeschoben werden, dass im Sinne des konstruktionsmethodischen Prinzips der Aufgabentrennung alle mechanischen Schnittgrößen von der Metall-Kunststoff-Tragestruktur übernommen werden, während die keramischen Bauteile die für die chemische Reaktion notwendigen Voraussetzungen gewährleisten und eine Wärmeisolierung garantieren. Dies erfordert eine sorgfältige und aufwendige numerische Untersuchung des statischen und dynamischen Verhaltens ebenso wie eine Betrachtung von Wärmefluß und thermischen Spannungen bzw. Dehnungen in der gesamten Struktur.

Auch hier ist wie beim letzten Beispiel durch die Anwendung einer Reihe unterschiedlicher Werkstoffe eine Anpassung an die funktionellen Anforderungen der Reaktionsmühle gefunden worden und im Sinne des Baukastensystems ein breiteres Anwendungsfeld gewährleistet.

## 6 Zusammenfassung

Anhand von einigen Beispielen konnte nachgewiesen werden, dass bei den vielfältigen Anforderungen an moderne und marktgerechte Produkte die Suche nach dem Werkstoff zur Erfüllung eines Teils dieser Anforderungen erhebliche Schwierigkeiten bereiten kann. In vielen Fällen gelingt eine Produktoptimierung nur durch die Kombination von Bauteilen aus unterschiedlichen, problemorientierten Werkstoffeigenschaften. Auch hier bedeutet die Werkstoffwahl immer einen Kompromiss zwischen den Produktanforderungen und den Werkstoffeigenschaften. Es konnte nachgewiesen werden, daß einerseits ein unterschiedliches Werkstoffverhalten in Abhängigkeit von der Belastung auch ohne Wechsel des Werkstoffs Optimierungspotenziale enthält (Plastizierungsvermögen der Metalle), andererseits selbst die Kombination einer Reihe von Werkstoffen Anforderungslücken hinterläßt, wie dies besonders bei den prozeßgerechten Maschinenlösungen in der Verfahrenstechnik zu beobachten ist.

Eines der wichtigsten Ergebnisse dieser Betrachtung ist die Forderung nach einer interdisziplinären Lösung des anstehenden Entwicklungsproblems. Der die Funktionen beherrschende Entwickler kann nur gemeinsam mit dem Werkstofffachmann die Produktanforderungen bezüglich ihrer Abbildung auf Werkstoffeigenschaften untersuchen und nach dem Prinzip des „Werkstoffe Gestaltens“ Werkstoffeigenschaften, geometrische Form, Funktionsbereitstellung, Verschleißverhinderung usw. entwickeln. In den weitaus meisten Fällen ist hierzu der Fertigungstechnologe notwendig, der die Realisierung dieser Gestaltung nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten leisten kann.

## 7 Literatur

- /1/ Kruse, P.J.: Anforderungen in der Systementwicklung. Erfassung, Aufbereitung und Bereitstellung von Anforderungen in interdisziplinären Entwicklungsprojekten. Diss. TU Clausthal 1995. Fortschrittberichte VDI, Reihe 20, Nr. 191. VDI-Verlag Düsseldorf 1996
- /2/ Dieter, G.E.: Engineering Design: A Materials and Processing Approach. McGraw-Hill, New York 1991
- /3/ Große, A.: Interdisziplinäre Werkstoffauswahl durch Aufbau eines Material Data Mart. Diss. TU Clausthal 2000
- /4/ VDI-Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. VDI-Verlag Düsseldorf 1993
- /5/ Fischer, D.R.: Entwicklung eines objektorientierten Informationssystems zur optimierten Werkstoffauswahl. Springer Berlin 1995 (Diss.)
- /6/ Achatt, W.; Simmchen, E.; Zouhar, G.: Konstruktionswerkstoffe des Maschinen- und Anlagenbaus. 5. Aufl. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. Stuttgart 1998
- /7/ Ashby, M.F.: Materials selection in Engineering Design. Indian Journal of Technology. Vol. 28 (1990) June-August, pp. 217-225
- /8/ Dietz, P.: Tragfähigkeitssteigerungen von Maschinenelementen durch teilplastische Verformungen. Konstruktion Oktober 10-1999, S. 27-35
- /9/ Rothe, F.: Spielbehaftete Laschenverbindungen bei quasistatischer Belastung unter der Berücksichtigung nichtlinearer Randbedingungen. Diss. TU Clausthal 1994
- /10/ Rübbelke, L.: Konstruktive Lösungen und Auslegungsmethoden für Hochgeschwindigkeitsabweiseradsichter aus Leichtbauwerkstoffen in der Verfahrenstechnik. Diss. TU Clausthal 1994
- /11/ Dietz, P. (Hrsg.): Verfahrenstechnische Maschinen bei besonderen mechanischen, thermischen oder chemischen Belastungen. Springer Berlin 2000
- /12/ Jakel, R.: Ein Beitrag zur Berechnung und konstruktiven Gestaltung keramischer Bauteile, dargestellt am Beispiel eines keramischen Heißgasventilators. Diss. TU Clausthal 1996
- /13/ Bade, S.: Einsatz einer Reaktionsschwingmühle zur simultanen Zerkleinerung und chemischen Reaktion von Ferrosilizium mit Chlorwasserstoff. Diss. TU Clausthal 1996
- /14/ Bock, U.; Schönert, K.: Charge Motion Model for Vibration Mills with High Excitation. Powder Technology 105, pp.311-320
- /15/ Dietz, P.; Grünendick, T.: Konstruktion einer kontinuierlich arbeitenden Schwingmühle mit hohen Beschleunigungen. Zwischenbericht zu einem von der AiF geförderten Forschungsvorhaben, 2000

## Konzeption eines integrierten Prozessmanagements in der Produktentwicklung

Goltz, M.

*Umfangreiche Projekte zur Entwicklung neuer Produkte stellen hohe Anforderungen an die Planung und Steuerung der damit verbundenen Prozesse. Die am Markt verfügbaren Werkzeuge bieten Anwendern zwar Unterstützung in Teilbereichen des Prozessmanagements. Allerdings lassen sich diese Werkzeuge nur isoliert voneinander einsetzen oder entsprechen nicht den Bedürfnissen der Produktentwicklung. Im folgenden Artikel werden die gängigen Methoden des Prozessmanagements kurz vorgestellt. Darüber hinaus wird ein Konzept für ein 3-stufiges integriertes Prozessmanagement entwickelt, dass die Vorteile der einzelnen Werkzeuge kombiniert und dadurch eine durchgängige Planung und Steuerung von Entwicklungsprozessen ermöglicht.*

*The successful management of complex projects developing innovative products demands precise planning and controlling of its related processes. There are several tools on the market supporting users in different areas of process management. However, most often these areas are isolated from each other or the tools do not meet the needs of product development. This article gives an overview of current process management tools followed by a concept of a 3-step integrated process management that combines these tools to enable an efficient planning and controlling of product development processes.*

### 1 Einleitung

Die in den letzten Jahren zu beobachtende Konzentration der Unternehmen auf ihre Kernkompetenzen hat dazu geführt, dass die Entwicklung und Fertigung komplexer Produkte in den seltensten Fällen von einem einzelnen Unternehmen getragen wird. Die daraus resultierenden Kunden-Lieferanten-Beziehungen umfassen nicht nur die Fertigung von Bauteilen oder Baugruppen, sondern in hohem Maße auch die komplette Entwicklung der zu liefernden Komponenten. Gerade im Umfeld der Produktentwicklung ist dazu eine enge Kooperation der beteiligten Unternehmen zu gewährleisten, um qualitativ hochwertige Produkte in möglichst kurzer Zeit bei gleichzeitig minimalen Kosten erfolgreich

am Markt platzieren zu können. Diese Art der Kooperation geht weit über den Austausch von Anforderungsdokumenten hinaus und muß dazu führen, dass Entwicklungspartner frühzeitig in konstruktionsrelevante Entscheidungsprozesse einbezogen werden. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor dafür ist die Definition eines optimal abgestimmten unternehmensübergreifenden Entwicklungsprozesses, der zum einen die unternehmensinternen Prozesse sinnvoll miteinander verbindet, ohne das darin enthaltene Know-How eines Unternehmens offenzulegen. Zum anderen muß es den Projektverantwortlichen jederzeit möglich sein, den aktuellen Entwicklungsstand zu überprüfen und gegebenenfalls korrigierend einzugreifen.

Zu diesem Zweck gibt es verschiedene Methoden und Tools, die den Anwender bei der Planung und Durchführung komplexer Projekte unterstützen. Dazu zählen sowohl die Werkzeuge des Prozessmanagements (PM), als auch die Geschäftsprozessmodellierung in Verbindung mit Workflowmanagementsystemen (WfMS). Hinzu kommt das Parameter Based Collaboration (PBC). Dieses Konzept wurde im Rahmen des EU-Forschungsprojekts SIMNET<sup>1</sup> entwickelt und innerhalb des PDM-Systems axalant™ der EIGNER + PARTNER AG als eigenständiges Modul umgesetzt. Allerdings stellen die genannten Werkzeuge nur Insellösungen dar. Im folgenden soll daher ein Konzept für ein integriertes Prozessmanagement entwickelt werden, welches die Vorteile der einzelnen Methoden derart kombiniert, dass eine durchgängige Planung und Steuerung komplexer Produktentwicklungsprozesse möglich wird.

---

<sup>1</sup> SIMNET – Workflow Management for Simultaneous Engineering Networks, gefördert mit Mitteln der Europäischen Kommission (EP-26780), Projektpartner: Siemens SGP Verkehrstechnik GmbH (A), EIGNER + PARTNER AG (D), Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH (D), Mission Critical SA (B), Eindhoven University of Technology (NL), Technische Universität Clausthal (D), IPS Ingeniería de Productos, Procesos y Sistemas Integrados S.L. (E)

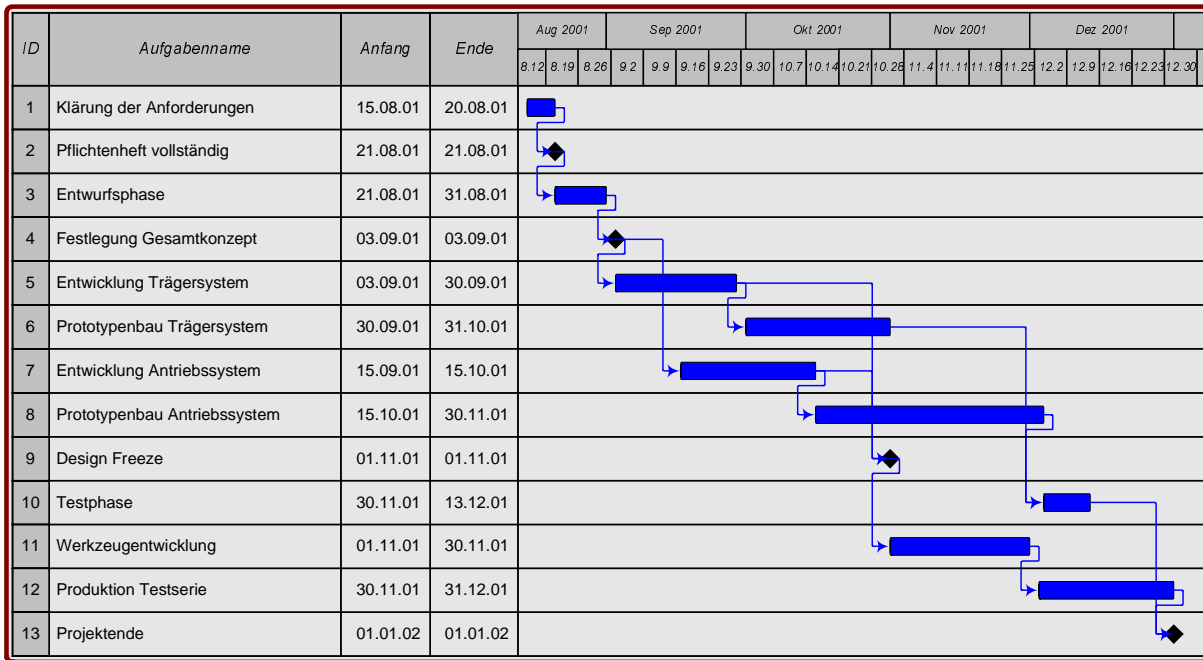


Bild 1: Balkendiagramm

## 2 Werkzeuge des Prozessmanagements

### 2.1 Projektmanagement

Nach DIN 69901 versteht man unter einem Projekt ein „Vorhaben, das im wesentlichen durch die Einmaligkeit seiner Bedingungen in ihrer Gesamtheit gekennzeichnet ist, wie z.B.

- Zielvorgaben,
- zeitliche, finanzielle, personelle Begrenzungen der Ressourcen oder andere Begrenzungen,
- Abgrenzungen gegenüber anderen Vorhaben,
- projektspezifische Organisation.“

Der Begriff des Projektmanagements ist ebenfalls in DIN 69901 definiert als „die Gesamtheit von Führungsaufgaben, -organisation, -techniken und -mitteln für die Abwicklung eines Projekts“.

Oft handelt es sich bei einem Projekt um eine komplexe Aufgabe, die von einem interdisziplinären Team zu bearbeiten ist. In bezug auf die angewandten Managementtechniken ist es zunächst unerheblich, ob sich dieses Projektteam nur aus Mitarbeitern eines einzelnen Unternehmens zusammensetzt, oder ob auch Mitarbeiter von Zulieferern und Kunden am Projekt beteiligt sind. Allerdings bedarf es bei letzterem eines höheren Koordinierungsaufwands, um unterschiedliche Vorgehensweisen und Organisationsstrukturen aufeinander abzustimmen.

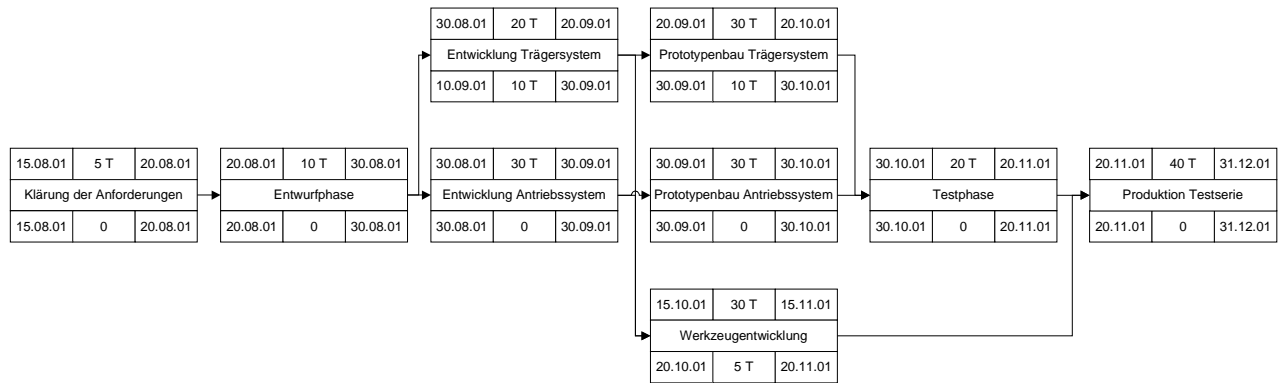
Die wesentlichen Aufgaben des Projektmanagements sind die Aufteilung des Gesamtprojekts in Teilaufgaben mit den entsprechenden Festlegun-

gen zu Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen, die Terminierung der Aufgaben, die Zuordnung benötigter Ressourcen sowie die Zeit- und Kostenbudgetierung. Anhand dieser Informationen lässt sich der Projektverlauf kontrollieren. Bei Abweichungen kann korrigierend eingegriffen werden.

#### 2.1.1 Gantt-Diagramm und Netzplantechnik

Für die Planung einfacher Projekte genügt häufig die Anwendung eines Balkendiagramms (**Bild 1**), auch „Gantt Chart“ genannt. Dabei werden die einzelnen Aufgaben als Balken dargestellt, dessen Länge ein Maß für die Dauer der Tätigkeit ist. Anfang und Ende lassen sich an der Positionierung des Balkens innerhalb des Diagramms ablesen. Grafische Überlappungen zeigen an, dass diese Tätigkeiten parallel ablaufen. Bei komplexen Projekten wird diese Darstellung jedoch schnell unübersichtlich. In diesen Fällen empfiehlt es sich, die Netzplantechnik einzusetzen. Zudem vereinfacht die strukturierte Vorgehensweise bei der Erstellung eines Netzplans die Projektplanung. **Bild 2** zeigt als Beispiel einen Vorgangsknoten-Netzplan.

Ausgehend von einem Projektstrukturplan, der die Gliederung des Projekts in Teilprojekte bis hin zu einzelnen Arbeitspaketen beinhaltet, wird eine Vorgangsliste aufgestellt. Jedem Vorgang lassen sich die benötigten Ressourcen sowie die veranschlagten Kosten zuordnen. Des weiteren werden in der Vorgangsliste die Abhängigkeiten zwischen den Projektschritten über Vorgänger-Nachfolger-Beziehungen festgehalten. Aus dieser Liste lässt sich

**Bild 2: Netzplan**

dann der Netzplan erstellen, mit dessen Hilfe die eigentliche Terminierung des Projektes durchgeführt wird. Bei der sogenannten Vorwärtsterminierung wird für jeden Vorgang der früheste Startzeitpunkt ermittelt. Aus der Dauer ergibt sich der früheste Endtermin. Mit einer anschließenden Rückwärtsterminierung, die vom Endtermin des Gesamtprojekts ausgehend jeweils die spätesten End- und Starttermine ermittelt, ergeben sich Puffer, die zur Beseitigung von Kapazitätsengpässen dienen können. Der kritische Pfad ergibt sich aus den Vorgängen ohne Pufferzeiten.

Meilensteine definieren Ereignisse, denen im Projektverlauf besondere Bedeutung zukommt. Dies können bestimmte Freigabezustände in der Entwicklung sein, beispielsweise „Design Freeze“ oder aber auch Ereignisse, bei denen wichtige Entscheidungen zu treffen sind /1/.

### 2.1.2 Einsatz in der Produktentwicklung

In bezug auf die Produktentwicklung eignet sich das Projektmanagement vor allem zur Planung und Steuerung des Gesamtprozesses auf einem hohen Abstraktionsniveau. Dabei läßt sich die terminliche Situation ebenso berücksichtigen wie die Verfügbarkeit der benötigten Ressourcen. Rückmeldungen aus den beteiligten Abteilungen ermöglichen eine genaue Kontrolle des Projektfortschritts und evtl. korrigierende Eingriffe in den Projektverlauf.

Für eine genaue Terminierung und Budgetierung ist es allerdings unabdingbar, den Projektablauf so zu planen, dass alle wesentlichen Aktivitäten in der richtigen Reihenfolge erfasst werden. Alternativen oder Schleifen im Netzplan führen zu unbestimmten Termin- und Kapazitätssituationen, da nicht im voraus festgelegt werden kann, welche Alternative zum Einsatz kommt bzw. wie oft eine Schleife durchlaufen werden muß. In solchen Fällen muß sich der Projektplaner auf eine Alternative und eine

festen Anzahl von Wiederholungen festlegen. Abweichungen davon können nur im Rahmen des Controllings festgestellt und korrigiert werden.

Zur Steuerung der detaillierten Aufgaben der Produktentwicklung ist das Projektmanagement nicht geeignet, da die Modellierung zu abstrakt ist. Diese orientiert sich zumeist an den Hauptbaugruppen der Struktur des zu entwickelnden Produkts oder an den Hauptentwicklungsschritten, wie z. B. die begleitende Entwicklung von Werkzeugen und Herstellungsverfahren. Weder das Gantt-Diagramm noch der Netzplan erlauben es, Informationsflüsse zu modellieren. Damit ist das Projektmanagement nicht geeignet, Teile des Entwicklungsprozesses zu automatisieren.

## 2.2 Geschäftsprozessmodellierung und Workflowmanagement

Allgemein kann ein Prozess als die inhaltlich abgeschlossene zeitliche und sachlogische Abfolge der Funktionen definiert werden, die zur Bearbeitung eines betriebswirtschaftlich relevanten Objekts notwendig sind. Ein Geschäftsprozess zeichnet sich zusätzlich dadurch aus, dass er ein für den Unternehmenserfolg relevantes Ergebnis erzeugt. Die Summe der Geschäftsprozesse eines Unternehmens repräsentieren seine Geschäftsart und weisen zwingend Schnittstellen zu anderen Marktteilnehmern auf /2/.

Zur Erfassung und Gestaltung von Geschäftsprozessen stehen unterschiedliche Modellierungstechniken zur Verfügung. Auf die erweiterte ereignisgesteuerte Prozesskette (eEPK) nach Scheer wird im nächsten Abschnitt näher eingegangen. Nach einer erfolgreichen Modellierung liegt es nahe, die aufgenommenen Prozesse soweit wie möglich mit Hilfe von Workflowmanagementsystemen (WfMS) zu automatisieren.

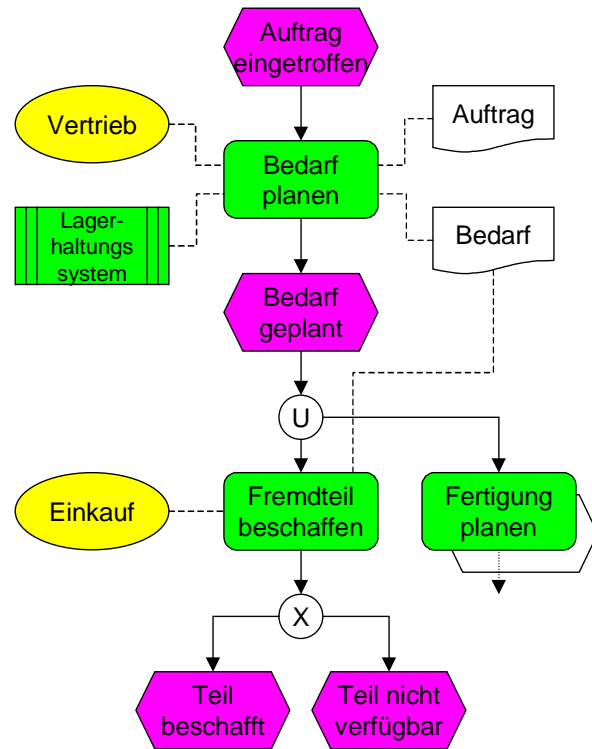
Die Workflow Management Coalition definiert in diesem Zusammenhang den Begriff Workflow als „The automation of a business process, in whole or part, during which documents, information or tasks are passed from one participant to another for action, according to a set of procedural rules.“ /3/. Dabei kann ein Workflow-Teilnehmer sowohl eine Person (beispielsweise ein Sachbearbeiter im Einkauf) als auch ein Softwaresystem sein, welches z.B. automatisch eine Berechnung durchführt. Das Ergebnis wird dann durch das WfMS automatisch seiner weiteren Verwendung zugeführt.

Workflowmanagementsysteme zeichnen sich dadurch aus, dass sie bestehende Softwaretools unter Einbeziehung organisatorischer Regeln miteinander verbinden. Hinzu kommt die Fähigkeit, das Eintreten vordefinierter Ereignisse registrieren zu können und Bedingungen zu überprüfen, bei deren Erfülltsein automatisch die entsprechenden Folgeaktionen veranlasst werden. Heutige WfMS gibt es entweder als Stand-Alone-Lösungen oder als integraler Bestandteil von PPS- (Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme) oder PDM-Systemen (Produktdatenmanagement).

### 2.2.1 Die erweiterte ereignisgesteuerte Prozesskette

Die ereignisgesteuerte Prozesskette ist ein Hilfsmittel zur Modellierung der Ablauffolge von Funktionen. Jede Funktion wird von einem Starterereignis ausgelöst und erzeugt seinerseits ein Endereignis, so dass sich im Ablaufdiagramm Ereignisse und Funktionen jeweils abwechseln müssen. Logische Verknüpfungsoperatoren ermöglichen die Modellierung paralleler oder alternativer Abläufe.

Wird die Darstellung um organisatorische Einheiten, die zu verwendenden Daten o.ä. ergänzt, spricht man von einer erweiterten ereignisgesteuerten Prozesskette (eEPK). Diese ist in **Bild 3** beispielhaft dargestellt. In bezug auf organisatorische Einheiten wird im Rahmen des Workflowmanagement häufig ein Rollenkonzept eingesetzt. Bei der Definition einer Workflowaufgabe wird anstelle einer konkreten Person (beispielsweise Herr Meier aus der Konstruktionsabteilung) eine organisatorische Rolle adressiert (z.B. „FEM-Experte“). Eine Rolle definiert in diesem Zusammenhang den Kontext in dem ein Akteur an einem bestimmten Prozess teilnimmt. Diese basiert dabei oft auf organisatorischen Konzepten, wie der Aufbauorganisation, Verantwortungen oder Befugnissen. Allerdings



**Bild 3:** Erweiterte ereignisgesteuerte Prozesskette

kann sie sich auch auf andere Eigenschaften wie Fähigkeiten, Standorte, Wertigkeiten oder Zeitpunkte etc. beziehen /4/.

### 2.2.2 Einsatzgebiete im Bereich der Produktentwicklung

Haupteinsatzmöglichkeiten für ein herkömmliches Workflowmanagementsystem ergeben sich bei der Automatisierung standardisierter Abläufe, wie z. B. Genehmigungs- und Freigabeverfahren, wiederkehrende Berechnungsabläufe oder verteilte Abstimmungsprozesse. In der Produktentwicklung lassen sich solche Systeme hauptsächlich als integraler Bestandteil von PPS- oder PDM-Systemen finden. Diese Systeme bieten zwar die für die Planung und Ausführung notwendige Datenbasis und die Möglichkeit, über Schnittstellen zu Fremdsystemen auch die entsprechenden Anwendungen zu starten. Allerdings stellt der Zwang zur Modellierung aller möglichen Funktionsabläufe mit ihren Start- und Endereignissen ein wesentliches Hindernis zur effektiven Nutzung der Workflow-Techniken dar. In verschiedenen Projekten wurde bereits versucht, über Prozesshierarchien und Klassifizierung eine Verknüpfung zwischen Elementen der Produktstruktur und den dazugehörigen Workflows herzustellen. Jedoch scheitern die meisten Ansätze am dafür notwendigen Modellierungsaufwand, der bei steigendem Detaillierungsgrad kaum vertretbar ist.

Im übrigen kann dieser Aufwand auch in bezug auf die verfügbaren Informationen über den beabsichtigten Prozessverlauf kaum geleistet werden. Die Notwendigkeit, bestimmte Prozessschritte durchzuführen, ergibt sich oft erst während der Produktentwicklung, wenn wesentliche konstruktive Entscheidungen getroffen werden. Das widerspricht allerdings dem Ziel einer möglichst genauen Planung bezüglich Terminen und Kosten.

Ein weiterer Mangel bezüglich der Planung von Workflows liegt in der fehlenden Terminierung der Arbeitsschritte. Da in der Definitionsphase keine Aussage über Zeitpunkt bei der späteren Ausführung gemacht werden können, beschränkt sich die terminliche Planung auf die Angabe von relativen Zeiträumen. Beispielsweise lässt sich eine Alarmfunktion aktivieren, wenn eine gestartete Aufgabe nicht nach einer vorgegebenen Zeit fertig gemeldet wird. Für ein effektives Controlling reichen diese Informationen aber nicht aus.

Abschließend lässt sich also sagen, dass das Workflowmanagement erhebliche Vorteile bei der Automatisierung von Standardabläufen bietet, sich diese aber im Umfeld der Produktentwicklung kaum nutzen lassen, da der täglichen Arbeit eines Konstrukteurs wesentlich komplexere Prozesse zugrunde liegen.

## 2.3 Parameter Based Collaboration

### 2.3.1 Einführung

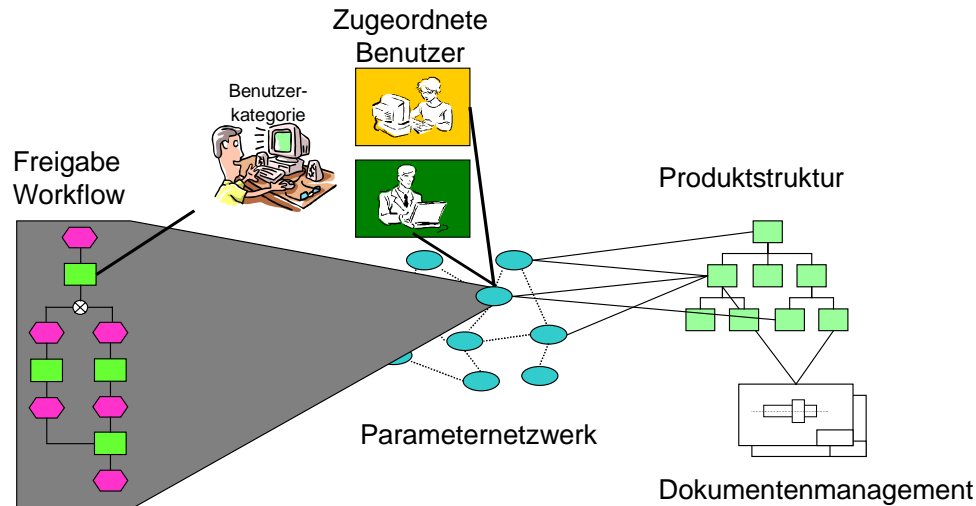
Um die Komplexität des Entwicklungsprozesses beherrschbar zu machen, wurde im Rahmen des EU-Projekts SIMNET ein Konzept eines unternehmensübergreifenden Engineering Workflows entwickelt und als eigenständiges Modul „Parameter Based Collaboration“ im PDM-System axalant™ der EIGNER + PARTNER AG umgesetzt. Im Mittelpunkt der Betrachtung stehen hierbei nicht die einzelnen Entwicklungsaufgaben, sondern Parameter, die die konstruktiven Eigenschaften eines Produkts über den gesamten Produktlebenszyklus festlegen. Diese Konstruktionsparameter lassen sich in funktionale (Leistung, Drehzahl), geometrische (Länge, Durchmesser) und materialbezogene Parameter (Werkstoffbezeichnung, Festigkeit) unterteilen. Jeder Parameter ist durch seinen Wert und, soweit anwendbar, eine physikalische Einheit charakterisiert. Für die unternehmensübergreifende Koordination von Produktentwicklungsprozessen ist allerdings nicht die Gesamtheit der Parameter eines Produktes zu betrachten (bei einem Fahrrad ca.  $10^3$

oder Auto ca.  $10^5$ ), sondern lediglich eine Untermenge von Parametern, die entweder das Gesamtprodukt betreffen, oder die in unterschiedlichen Abteilungen bzw. Unternehmen bearbeitet werden. Damit lässt sich beispielsweise die Anzahl der für die Entwicklung eines Autos maßgeblichen Schlüssel- und Schnittstellenparameter auf ca. 500 reduzieren.

Entscheidend für den Erfolg des Parameter Based Collaboration ist die Tatsache, dass nicht der Prozess im Mittelpunkt der Betrachtung steht, sondern die Produktdaten in Form des Parameters als kleinstes Produktdatenelement. Workshops mit Entwicklungsingenieuren haben gezeigt, dass diese Art der Betrachtung der Arbeitsweise in der Produktentwicklung wesentlich näher kommt. Diese ist dadurch gekennzeichnet, dass das Ziel nicht unbedingt ein optimaler Geschäftsprozess ist, sondern eine fehlerfreie Produktdefinition. Eine fehlerfreie Produktdefinition beruht auf einer Vielzahl von Entscheidungen bezüglich einer Anzahl technischer Parameter, die untereinander ein komplexes Beziehungsgeflecht aufweisen. D.h. ein Entwickler ist einerseits zwar verantwortlich, einen bestimmten Parameter zu definieren. Andererseits ist er in seiner Entscheidung abhängig von Randbedingungen, die durch Parameter anderer Entwickler definiert werden. Daraus ergibt sich ein erheblicher Kommunikations- und Informationsbedarf, der sich nicht über die Formulierung herkömmlicher Geschäftsprozesse erfassen lässt. Zumeist ist den Beteiligten zwar klar, welche Aufgaben zu erledigen sind. Allerdings fehlt häufig die Transparenz über verfügbare Daten und die Weiterverwendung der erzeugten Ergebnisse. Zur Identifikation des Kommunikationsbedarfs wird beim PBC ein Konzept von Nutzerkategorien eingeführt. In Abhängigkeit ihrer Stellung zu einem Parameter werden Anwender in fünf verschiedene Nutzerkategorien eingeteilt:

- Bearbeiter, technisch verantwortlich für die Entwicklung eines Parameterwertes, trägt dafür Sorge, dass die Beteiligten einen Konsens finden (verantwortlicher Konstrukteur);
- Beteiligter, aktiv an der Ausarbeitung eines Parameterwertes beteiligt;
- Prüfer, Aufgabenbereich ist vom Parameterwert betroffen (z.B. Fertigungsplaner);
- Abonnent, nimmt nicht aktiv an der Gestaltung des Parameterwertes teil, ist aber an diesem interessiert;





**Bild 4:** Parameter Based Collaboration

- Gesamtverantwortlicher, aus organisatorischer Sicht für die Freigabe des Parameterwertes verantwortlich (Projektleiter).

Die Zuordnung einzelner Personen zu Nutzerkategorien ist parameterabhängig. D.h., ein Konstrukteur kann beispielsweise in Bezug auf den Parameter „Wellenlänge“ als Bearbeiter agieren, während er gleichzeitig ein Beteiligter bezüglich des Parameters „Antriebsmoment“ ist.

Die eigentliche formale Kommunikation wird über einen Genehmigungs- und Freigabeworkflow gesteuert. Dieser wird vom Bearbeiter gestartet, wenn sich entweder bei der Diskussion ein Konsens abzeichnet, oder der Projektstand eine Absicherung der erreichten Ergebnisse erfordert.

Die Aussagefähigkeit eines Parameterwertes wird durch ein erweitertes Statusmanagement erhöht. Hierbei wird zusätzlich zum Status (beispielsweise „in Arbeit“, „Freigegeben“) ein Härtegrad von 1 bis 5 angegeben. Der Härtegrad spiegelt den Reifestand eines Parameterwertes wider, d.h. Härtegrad 1 bedeutet, dass es sich bei dem Wert um eine erste Annahme handelt, während Härtegrad 5 einen abgesicherten Wert darstellt, der nicht mehr verändert werden darf. Nach erfolgreicher Produktentwicklung sind demzufolge alle Parameter im Härtegrad 5 freigegeben.

**Bild 4** zeigt die Einbindung des Parameter Based Collaboration in das PDM-Umfeld. Durch die Zuordnung von Parametern zu Bauteilen und Baugruppen lassen sich Abhängigkeiten innerhalb der Produktstruktur sehr genau erfassen. Dieses ermöglicht im Falle von Änderungen eine sukzessive Überprüfung der Auswirkungen innerhalb des Parameternetzwerkes und der dazugehörigen Produktkomponenten /5/, /6/, /7/.

### 2.3.2 Parameternetzwerke als Planungs- und Steuerungsinstrument

Parameter Based Collaboration stellt einen völlig neuen Ansatz dar, die Zusammenarbeit innerhalb der Zulieferkette über den gesamten Produktlebenszyklus zu steuern. Basierend auf der Betrachtung von Parametern lassen sich alle Personen inner- und außerhalb eines Unternehmens identifizieren und bedarfsgerecht informieren, die an technischen Entscheidungen teilhaben müssen. Der parameterbasierte Genehmigungs- und Freigabeworkflow ermöglicht darüber hinaus eine dokumentenfreie Qualitätssicherung in der Produktentwicklung. Damit bietet sich das PBC als Instrument zur Steuerung der täglichen Entwicklungsarbeit an. Die initiierte Kommunikation führt dazu, dass die Beteiligten einerseits einen guten Überblick über den aktuellen Entwicklungsstand bekommen. Andererseits werden Probleme durch die Transparenz in den Abhängigkeiten der Parameter untereinander offensichtlich.

Ein Nachteil der vorgestellten Methode ist jedoch die fehlende Rückkopplung zu Terminen im übergeordneten Projektplan. Obwohl Parameter über einen Status und einen Härtegrad verfügen, lässt sich keine Aussage darüber treffen, ob das Gesamtprojekt zeitlich und kostenmäßig im Plan liegt. Hierzu bedarf es einer weitergehenden Verknüpfung mit dem Projektmanagement, welches im folgenden Abschnitt vorgestellt werden soll.

## 3 Konzept für ein integriertes Prozessmanagement

### 3.1 3-stufiges Prozessmodell

Die bislang vorgestellten Methoden unterstützen den Anwender auf unterschiedlichen Ebenen bei



der Planung und Steuerung der Produktentwicklung. Ein wesentlicher Nachteil dabei ist aber, dass diese Instrumente bislang isoliert voneinander eingesetzt werden. Das führt einerseits zu der Notwendigkeit, verschiedene Elemente mit gleicher oder zumindest ähnlicher Bedeutung mehrfach zu modellieren, wie beispielsweise Personalressourcen im Rahmen des Projektmanagements und Rollen bei der Modellierung von Workflows. Andererseits verhindert die mangelnde Integration Rückkopplungen zwischen Prozessen auf unterschiedlichen Ebenen, die für ein effektives Controlling des Projektfortschritts unabdingbar sind. Deshalb soll im folgenden ein Konzept für ein 3-stufiges Prozessmodell entwickelt werden, welches die Vorteile der hier vorgestellten Einzelmethoden nutzt und diese zu einem integrierten Prozessmanagement kombiniert. Die daraus resultierende Prozessbeschreibung ermöglicht eine bedarfsgerechte Planung und Steuerung der Aktivitäten der Produktentwicklung.

Die oberste Ebene des 3-stufigen Prozessmodells bildet das Projektmanagement, welches die einzelnen Arbeitspakete definiert und den Zeit- und Kostenrahmen vorgibt. Die Einhaltung dessen wird anhand automatisierter Rückmeldungen aus den untergeordneten Ebenen kontrolliert.

Die für die Bearbeitung der Arbeitspakete notwendigen Standardaufgaben werden mit Hilfe des Workflowmanagements verwaltet. Auf dieser Ebene werden formale Abläufe definiert, die zur Ausführungszeit wiederholt abgearbeitet werden können. Dazu zählen u.a. auch Freigabeabläufe, die direkte Auswirkungen auf der Projektebene haben, wie beispielsweise das Erreichen eines bestimmten Meilensteins. Zusätzlich lassen sich Aufgaben definieren, die unter vorgegebenen Bedingungen eine Rückmeldung an die Projektmanagementebene erzeugen.

Die Koordination der einzelnen Entwicklungsaktivitäten ist dann Bestandteil des Parameter Based Collaboration. Auf dieser Ebene lassen sich keine sinnvollen Abläufe im Sinne von Geschäftsprozessen vordefinieren, so dass als Steuerungsinstrument Produktdaten in Form eines Parameternetzwerkes verwendet werden. Durch den Genehmigungs- und Freigabeworkflow ergibt sich eine Verknüpfung zur darüber liegenden Ebene des Workflowmanagements. Des weiteren dienen die Parameter als unternehmensübergreifende Kommunikationsplattform für die beteiligten Personen.

Dieses Konzept bildet die Grundlage für ein rechnergestütztes Planungs- und Steuerungssystem.

### **3.2 Controlling auf Projektebene**

Da sich das Projektmanagement in der Produktentwicklung zumeist an der Struktur des Produktes orientiert, ist es sinnvoll, einzelnen Arbeitspaketen die entsprechenden Hauptkomponenten zuzuordnen. Die erfolgreiche Durchführung des Arbeitspaketes lässt sich dann anhand des Freigabestandes dieser Komponente kontrollieren. Dazu ist es aber nicht notwendig, bereits in der Definitionsphase des Projekts über detaillierte Informationen zur Produktstruktur zu verfügen. Bei Bedarf werden noch zu entwickelnde Komponenten den jeweiligen Baugruppen zugeordnet. Eine Bottom-Up-Freigabe stellt sicher, dass alle untergeordneten Elemente den notwendigen Entwicklungsstand erreicht haben, bevor eine Hauptkomponente freigegeben wird. Der aktuelle Stand lässt sich über eine Top-Down-Navigation ermitteln.

Eine weitere Möglichkeit der Prozesssteuerung auf Projektebene ergibt sich aus der Zuordnung von Parametern zu Produktkomponenten. Beim Start eines Arbeitspaketes lässt sich der Status der Parameter aktiv beeinflussen, die der Hauptkomponente dieses Arbeitspaketes zugeordnet sind. Parameter, die nicht durch Kundenanforderungen vordefiniert sind, erhalten so automatisch den Status „in Arbeit“. Damit werden über einen Notification Service die zugeordneten Personen informiert, dass für diesen Parameter ein Wert zu erarbeiten ist.

### **3.3 Steuerung formaler Abläufe durch das Workflowmanagementsystem**

Formale Abläufe in der Produktentwicklung betreffen zumeist die Freigabe von Komponenten und den dazugehörigen Dokumenten. Hinzu kommt der Genehmigungs- und Freigabeworkflow für Parameter. Um diese Vorgänge in einen zeitlichen Kontext mit dem Gesamtprojekt zu bringen, ist es notwendig, Ereignisse im Zusammenhang mit dem Projektmanagement zu definieren. Dabei erfolgt die Integration über die Produktstruktur. Das Eintreten projektspezifischer Ereignisse (Erreichung eines bestimmten Meilenstein, Terminüberschreitung o.ä.) kann entweder direkt den Status von Produktkomponenten beeinflussen, oder einen entsprechenden Workflow triggern, der eine Statusänderung hervorruft.

Darüber hinaus dient das Workflowmanagement dazu, Rückmeldungen für die Projektebene zu liefern. Dazu lassen sich Aufgaben definieren, die den Benutzer auffordern, nach erfolgter Freigabe die dafür benötigten Ressourcen abzurechnen. Damit ist gleichzeitig die richtige Zuordnung bei der Abrechnung gewährleistet.

### 3.4 Steuerung der Produktentwicklung durch Parameter Based Collaboration

Das Haupteinsatzgebiet für Parameter Based Collaboration ist die Entwicklung standardisierter Produkte, die lediglich in einem überschaubaren Umfang an Kundenwünsche angepasst werden, wie z.B. Plattformkonzepte in der Automobilindustrie. In diesen Fällen gibt ein teilweise vordefiniertes Parameternetzwerks die Reihenfolge vor, in der für die einzelnen Parameter Werte festzulegen sind. Die Beziehungen im Parameternetzwerk definieren für jeden Entwicklungsschritt eindeutige Randbedingungen. Die Zuordnung von Personen zu Nutzerkategorien legt die notwendige Interaktion zwischen den beteiligten Projektpartnern fest.

Das Parameternetzwerk ist dabei einerseits Bestandteil der Prozessdefinition. Andererseits sind Parameter selbst Produktdaten, die die zu bearbeitenden Objekte des Prozesses darstellen. Die Zuordnung von Parametern zu Arbeitspaketen auf der Projektebene und zum Genehmigungs- und Freigabeworkflow ergibt eine weitere enge Verzahnung zwischen dem Produkt- und Prozessmodell.

Der formalisierte Genehmigungs- und Freigabeworkflow lässt sich in der Ebene der Geschäftsprozesse in weitere Workflows einbauen, so dass beispielsweise nach erfolgreicher Freigabe aller zugeordneten Parameter einer Produktkomponente, der entsprechende Freigabeworkflow auf Bauteilebene gestartet werden kann.

## 4 Zusammenfassung

Ein wesentlicher Vorteil des integrierten Prozessmanagements ist eine in sich konsistente Prozessbeschreibung, die eine durchgängige Planung und Steuerung von komplexen Produktentwicklungen ermöglicht.

Effizientes Prozessmanagement lässt sich nicht durch den isolierten Einsatz der Werkzeuge des Projekt- und Workflowmanagements oder des Parameter Based Collaboration erreichen. Dazu bedarf es zusätzlicher Verknüpfungen zwischen den

unterschiedlichen Methoden auf der einen Seite, und einer Verknüpfung des Prozessmodells mit der Produktstruktur auf der anderen Seite.

Während sich das Projektmanagement zur Planung und Steuerung auf einem sehr abstrakten Niveau eignet, dienen Workflowtools der konkreten Unterstützung der Anwender bei standardisierten Teilprozessen. Darüber hinaus stellen Workflows das Bindeglied zwischen dem Projektmanagement und dem Parameter Based Collaboration dar. Projektspezifische Ereignisse können einerseits dazu genutzt werden, Elemente der Produktstruktur direkt zu beeinflussen. Andererseits, können diese Ereignisse direkt Prozesse auf der Workflowebene starten. Der Schwerpunkt des PBC liegt auf der Unterstützung des kreativen Teils der Ingenieurstätigkeit und der Verbesserung der unternehmensübergreifenden Kommunikation. Dabei stellt das Parameternetzwerk eine Kombination aus Prozess- und Produktmodell dar.

## 5 Literatur

- /1/ Zielasek, Gotthold: Projektmanagement als Führungskonzept; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1999
- /2/ Vossen, Gottfried; Becker, Jörg: Geschäftsprozeßmodellierung und Workflowmanagement; Internat. Thomson Publ. Bonn, Albany; 1996
- /3/ Workflow Management Coalition: Terminology & Glossary; Winchester; 1999
- /4/ Scheer, August-Wilhelm: Wirtschaftsinformatik: Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1997
- /5/ Schmitt, Reinhard: Unternehmensübergreifender Engineering Workflow; Papierflieger Clausthal-Zellerfeld; 2001
- /6/ Goltz, M.; Schmitt, R.; Vanden Bossche, M.: Managing the Development and Engineering Changes of Complex Products in a Distributed Engineering Environment; published at the eBusiness & eWork Conference, Madrid, 18-20 October 2000

## Die Rapid Tooling Verfahrenskette

Trenke, D.

*Dem generierenden, schichtweisen Fertigungsverfahren des Rapid Toolings kommt im industriellen Einsatz eine immer größere Bedeutung zu. Dies liegt im Wesentlichen an der Möglichkeit, sehr schnell komplexe Strukturen aufzubauen. Die Qualität der erzeugten Bauteile hängt überdies von der Güte jedes einzelnen Verfahrensschrittes ab.*

*The generating layering manufacturing process of rapid tooling is increasing its importance in the industrial use. This essentially depends on the opportunity to create complex structures very fast. The quality of the hereby produced component parts moreover depends on the good workmanship of every single process step.*

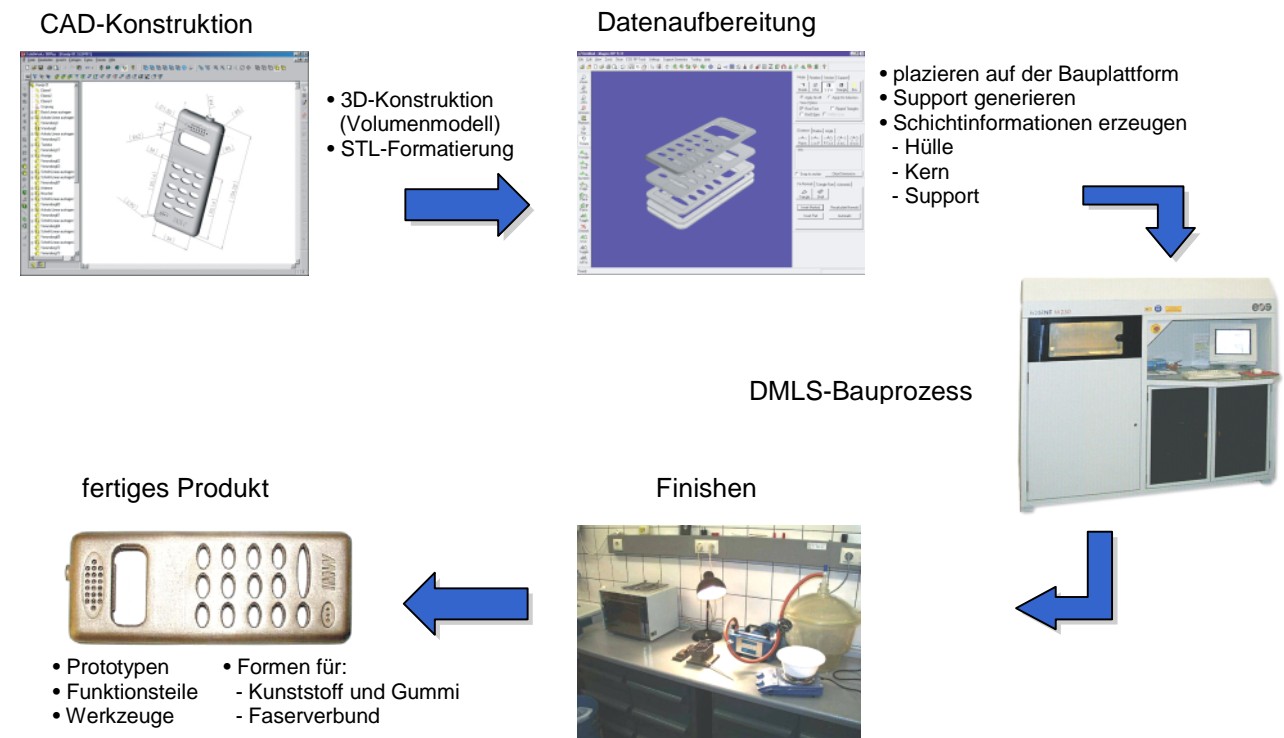
### 1 Die Rapid Tooling Verfahrenskette

Die Rapid Tooling bzw. Rapid Prototyping Verfahrenskette (siehe **Bild 1**) beginnt mit der 3D-CAD-Konstruktion des zu sinternden Bauteils.

reiteten Modelldaten werden zur Rapid Tooling Anlage übermittelt, in der schichtweise das stoffliche Modell mit Hilfe eines Lasers erzeugt wird. Abschließend können Werkstoffeigenschaften der gesinterten Werkstücke durch verschiedene Nachbearbeitungsverfahren (Infiltration mit Epoxidharz, Sandstrahlen, Polieren, usw.) noch gezielt verbessert werden.

#### 1.1 Die CAD-Konstruktion

Wie einleitend erwähnt, beginnt die Rapid Tooling Verfahrenskette mit der CAD-Konstruktion des herzustellenden Werkstücks, wie z. B. eines Prototypens, einer Gussform oder eines Funktionsteils. Bei der Wahl des Konstruktionsprogramms ist darauf zu achten, dass ein 3D-Volumenmodell erzeugt wird. Beim Erzeugen eines 3D-Flächenmodells, welches optisch ebenfalls geschlossen aussieht, würden beim anschließenden generieren der

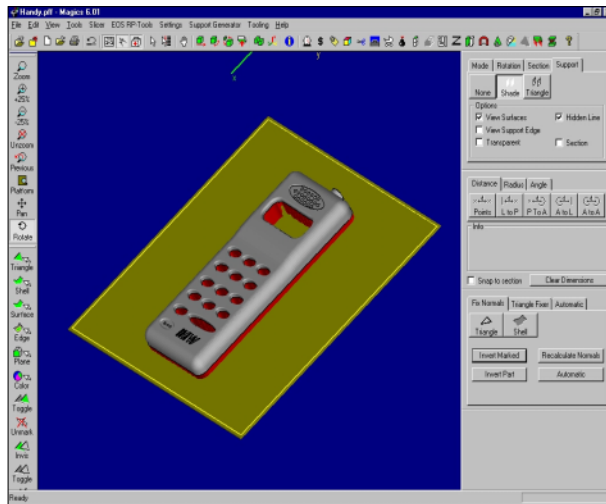


**Bild 1:** Die Rapid Tooling Verfahrenskette

Das so erzeugte Computermmodell wird anschließend mit einer speziellen Rapid Tooling Software für den Lasersinterprozess vorbereitet (Erzeugen von Stützstrukturen, Platzieren im Bauraum, Generieren der Schichtinformationen, usw.). Die aufbe-

Schichtinformationen nur Konturen entstehen. Beim Lasersintern werden aber Flächen benötigt, die im Rapid Tooling Bauprozess aufgeschmolzen werden.





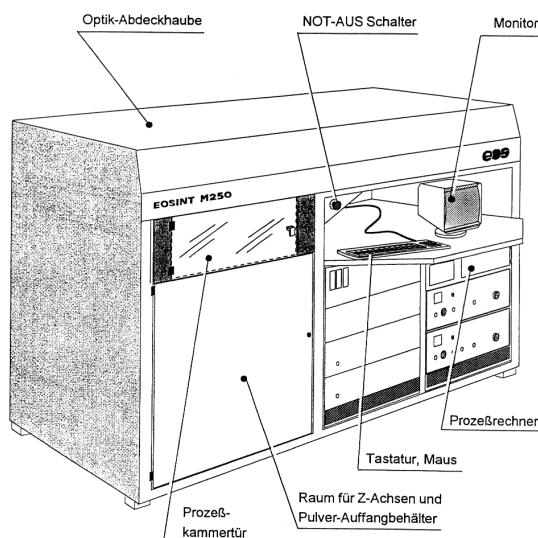
**Bild 4:** Werkstück, Support und Bauplattform

Anschließend werden die erzeugten Schichtinformationen zur Rapid Tooling Anlage übertragen, wo dann - entsprechend diesen Informationen - das stoffliche Modell mittels eines Lasers schichtweise generiert wird.

### 1.3 Der DMLS-Bauprozess

Die am Institut für Maschinenwesen verwendete Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250 (siehe **Bild 5**) besteht im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- einem CO<sub>2</sub>-Laser (200 W), zum Aufschmelzen des Metallpulvers,
- der Trägerplattform mit aufgesetzter Bauplattform,
- der Dosierplattform, zur Bevorratung des Pulvers,
- dem Abstreifer, zum Auftragen des Metallpulvers auf die Bauplattform und
- dem Prozessrechner mit der Steuerungssoftware.



**Bild 5:** Die Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250

Zu Beginn des Sinterprozesses (siehe **Bild 6**) wird die Bauplattform erstmalig mit einer dünnen Metallpulverschicht bedeckt. Diese Schicht wird dann, entsprechend der ersten Schichtinformation über die Geometrie des herzustellenden Bauteils, von einem CO<sub>2</sub>-Laser aufgeschmolzen.

Nachdem so die erste Schicht belichtet wurde, wird die Bauplattform um die nächste Schichtdicke (0,05 mm) abgesenkt und der Abstreifer bis zum Anschlag rechts von der Dosierplattform gefahren. Das Absenken der Bauplattform ist erforderlich, da durch die hohe Oberflächenspannung des Metallpulvers jede Schicht nach der Belichtung eine unregelmäßige, raue Oberfläche besitzt, an welcher der Abstreifer hängen bleiben könnte.

Hat der Abstreifer seine Position rechts vom Werkstück erreicht, wird die Dosierplattform soweit angehoben, bis genügend Pulver zur Verfügung steht, um die Bauplattform erneut vollständig zu bedecken.

Als nächstes fährt der Abstreifer wieder nach links, und trägt so die nächste Pulverschicht auf, die dann entsprechend der zweiten Schichtinformation über das Bauteil aufgeschmolzen wird. Bei dieser Verfahrensbewegung glättet der Abstreifer gleichzeitig die Oberfläche des Bauteils.

Überflüssiges Pulver fällt über den links neben der Bauplattform befindlichen Schacht in die Auffangbehälter.

Die Belichtungsparameter werden beim Sinterprozess so gewählt, dass sich die neue Schicht mit der darunter liegenden fest verbindet.

Dieser Vorgang wiederholt sich so lange, bis aus den CAD-Informationen ein vollständiges, dreidimensionales stoffliches Bauteil entstanden ist.

Grundlage für die maximal erreichbare Qualität der lasergesinterten Bauteile sind die Materialeigenschaften des verwendeten Metallpulvers. Hierbei spielen insbesondere das Sinterverhalten und die Partikelgrößenverteilung eine entscheidende Rolle.

Das am IMW verwendete Metallpulver DirectMetal 50-V2 wurde speziell für das direkte Lasersintern entwickelt und besteht überwiegend aus einer Bronze-Nickel-Vermischung mit einem geringen Kupfer-Phosphid (Cu-P) Anteil, der als niedrigschmelzender Binder dient.

Trifft der Laserstrahl während des Bauprozesses auf die Metallpulveroberfläche wird ein Teil der Laserenergie absorbiert, wodurch sich das Pulver erwärmt. Sobald die eingebrachte Energie groß ge-



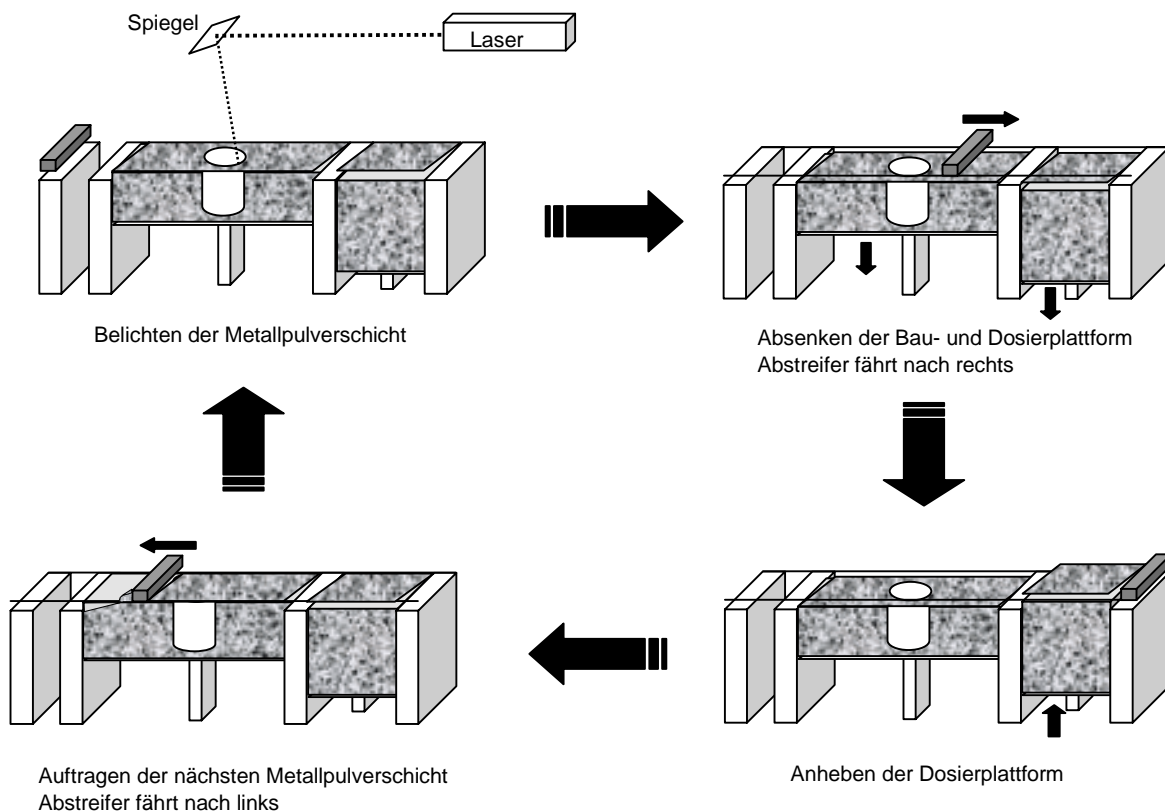
nug ist, um das Pulver auf eine Temperatur von  $660^{\circ}\text{C}$  zu erwärmen, schmilzt das Kupfer-Phosphid. Als nächstes dringt die nun flüssige Kupfer-Phosphid-Phase in die umgebenden Hohlräume und benetzt dabei die Bronze- und Nickelteilchen. Es kommt zu weiteren Phasenbildungen. Oberhalb von  $850^{\circ}\text{C}$  findet durch Poren- und Mischkristallbildung eine Expansion des makroskopischen Pulvervolumens zur Kompensation des bis dahin erfolgten Sinterschwundes statt.

Im Idealfall ist das Volumen des Körpers jetzt wieder identisch mit dem Volumen der losen Pulverschüttung.

Durch diesen Aufschmelzprozess und das anschließende Abkühlen entsteht die stabile metallische Matrix des gesinterten Bauteils.

Typischerweise besitzt der Hüllbereich eine Schichtdicke von 0,05 mm. Die Schichtdicke des Kernbereichs beträgt 0,1 mm. Hierdurch verkürzt sich die Bauzeit in erheblichem Maße, ohne dass es zu Qualitätsverlust an der Oberfläche des Werkstückes kommt.

Aufgrund dieses Hülle-Kern-Aufbaus sollten Bohrungen für Auswerfer oder Zapfen, Löcher für Befestigungsschrauben, Kühlkanäle, usw. bereits in der CAD-Konstruktion berücksichtigt werden. Werden diese Bohrungen im CAD-File nicht vorgesehen und erst nachträglich eingebracht, verläuft die Materialausparung durch den mechanisch wesentlich instabileren Kernbereich. Dies kann zur Folge haben, dass z. B. nachträglich geschnittene Gewinde ausbrechen.



**Bild 6:** Der Rapid Tooling Bauprozess

Eine weitere Besonderheit des DMLS-Sinterprozesses ist, dass die Werkstücke in einer sogenannten Hülle-Kern-Struktur aufgebaut werden.

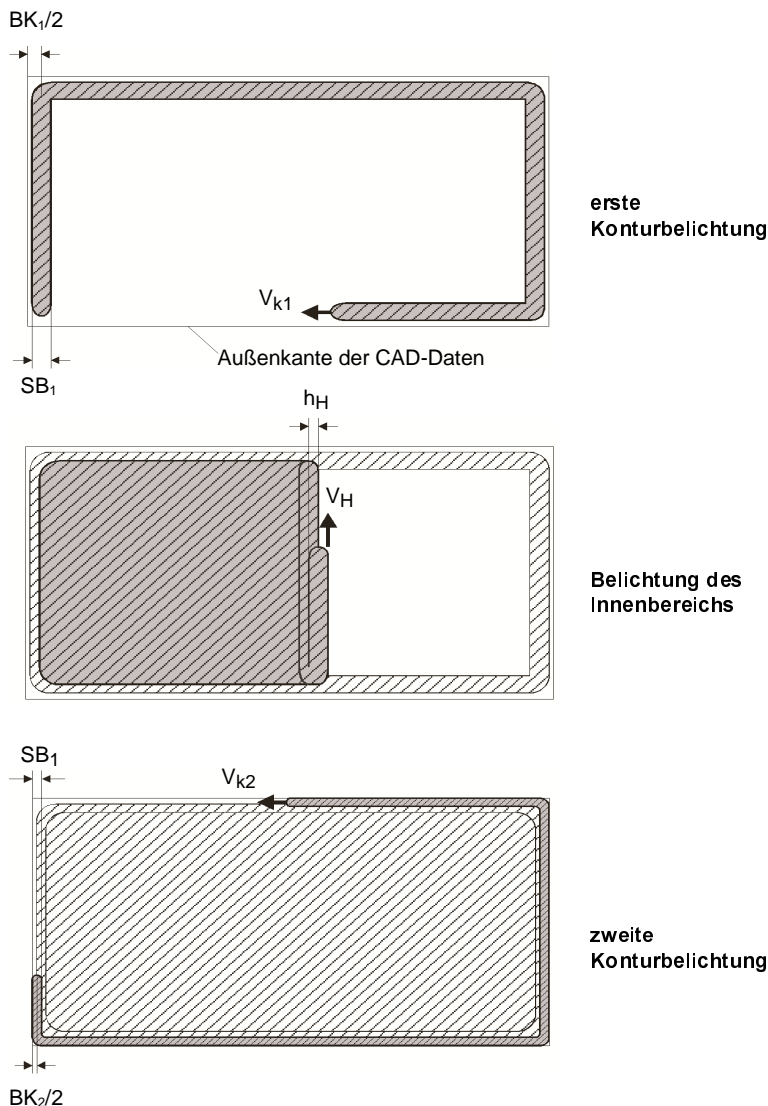
Dies bedeutet, dass das Bauteilvolumen in einen Hüllbereich (Skin) und einen Kernbereich (Core) aufgeteilt wird, die mit unterschiedlichen Belichtungsparametern und sogar mit unterschiedlichen Schichtdicken aufgebaut werden. Ziel dieser Unterscheidung ist es, eine harte Oberfläche bei gleichzeitig weichem Bauteilinneren zu erreichen.

Bei der Laserbelichtung wird zunächst die Kontur der Schichtstruktur ein erstes Mal abgefahren.

Da der fokussierte Laserstrahl einen gewissen Aushärtebreite (0,6 mm) besitzt, muss, um sicherzustellen, dass die Kontur des späteren Bauteils genau dem Maß der CAD-Konstruktion entspricht, der Fokuspunkt um die Hälfte der Aushärtebreite - von der Kontur aus nach innen - versetzt werden. Diese Positionskorrektur des Fokuspunktes wird als Strahlkompensation (siehe **Bild 7**) bezeichnet. Sie entspricht bei der ersten Konturbelichtung etwas

mehr als die Hälfte der Breite einer durch den Laserstrahl verfestigten Spur.

Nach der Belichtung der Kontur wird der gesamte Innenbereich verfestigt. Der Laserstrahl fährt dabei die Fläche Linie für Linie ab: dies geschieht mit sehr hoher Füllgeschwindigkeit. Der Abstand der Linien, der sogenannte Füllabstand, beträgt nur etwa ein Viertel des Fokaldurchmessers. Dadurch fährt der Laserstrahl mehrmals über einen zu belichtenden Punkt und gewährleistet, dass hier über einen längeren Zeitraum die Temperatur auf einem hohen Niveau gehalten wird, um sicherzustellen, dass die Sinterprozesse vollständig ablaufen können.



**Bild 7:** Strahlkompensation beim Lasersintern

Nachdem der gesamte Innenbereich verfestigt wurde, erfolgt eine zweite Belichtung der Außenkontur des Bauteils. Hier wird die Konturkompensation des Lasers auf den exakten Wert eingestellt, um zu gewährleisten, dass die Kanten des Bauteils genau den CAD-Daten entsprechen und somit maßgenaue Teile aufgebaut werden können.

Diese zweite Belichtung der Kontur hat zwei wesentliche Vorteile:

Durch die höhere Wärmeleitung des bereits verfestigten Materials im Bereich der ersten Kontur entstehen aufgrund höherer Temperaturgradienten schärfere Bauteilkonturen: dadurch sinken die Rauigkeiten der vertikalen Flächen.

Da das Material bereits bei der Belichtung der ersten Kontur und des Innenbereiches in x-y-Richtung geschwunden ist, erzeugt die zweite Belichtung eine Kontur, die den Maßen der Konstruktion entspricht. Die Genauigkeit des Bauprozesses wird gesteigert.

Durch Variation der Scangeschwindigkeit  $V_h$  und des Fülllinienabstands  $h$  wird das Bauteilvolumen bzw. die Bauteildichte beeinflusst, was wiederum zu unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften führt:

Bei einer niedrigen Scangeschwindigkeit und kleinem Fülllinienabstand steigt die Dichte des gesinterten Werkstücks: dadurch werden höhere mechanische Festigkeiten erzielt.

Im Einzelnen sind dies:

- Biegebruchfestigkeit,
- Zugfestigkeit,
- Härte und
- Druckfestigkeit,
- zudem steigt die Wärmeleitfähigkeit.

Bei hohen Scangeschwindigkeiten und großen Fülllinienabständen verringert sich die Dichte und damit die Festigkeit des Werkstücks - gleichzeitig sinkt aber die benötigte Bauzeit.

Die Qualität der horizontalen (x-y) Oberflächen hängt ebenfalls von der Scangeschwindigkeit  $V_h$  und dem Fülllinienabstand  $h$  ab.

Bei kleinen Scangeschwindigkeiten und geringen Fülllinienabständen ergeben sich niedrigere Oberflächenrauigkeiten.

Die Güte der vertikalen Oberflächen (z) wird unter anderem durch die Konturgeschwindigkeit  $V_k$  bestimmt. Eine niedrige Geschwindigkeit bedeutet hier ebenfalls eine geringe Oberflächenrauigkeit.

Die Bauteilqualität wird aber nicht nur von den verschiedenen Prozessparametern beeinflusst, sondern

auch wesentlich von den unterschiedlichen Belichtungsstrategien und Belichtungsparametern.

#### 1.4 Finischen

Nachdem die Bauteile gesintert wurden, werden sie zusammen mit der Bauplattform aus der Rapid Tooling Anlage genommen.

Als nächstes werden eventuell vorhandenen Supportstrukturen entfernt.

Zur Verbesserung der Oberflächenqualität werden die Werkstücke in der Regel noch sandgestrahlt; dadurch wird eine Oberflächenrauigkeit von ca. 20 µm erreicht.

Durch Polieren und Strahlen sind aber auch Oberflächenqualitäten von 2-3 µm möglich.

Nach dem Sintern besitzen die Bauteile eine Restporosität von ca. 30 % - darum werden sie häufig noch infiltriert: hierzu können niedrig schmelzende Metalle oder Epoxidharze verwendet werden.

Die Epoxidharz-Infiltration hat sich dabei als besonders geeignet herausgestellt. Zum einen ist sie sehr unkompliziert und schnell anzuwenden (das Bauteil wird lediglich mit dem Epoxidharz eingestrichen und 2 h bei 160°C ausgehärtet), zum anderen wird eine Festigkeitssteigerung von 160 N/mm<sup>2</sup> auf 200 N/mm<sup>2</sup> erzielt.

Nach der Infiltration sind die Bauteile 100 % dicht, was insbesondere für Kühlkanäle sehr wichtig ist.

Es ist aber auch möglich, die Bauteile mit anderen Metallen, wie z. B. Kupfer, zu infiltrieren.

Die lasergesinterten Bauteile können zur Weiterbearbeitung auch geschweißt, gelötet, erodiert oder spanend bearbeitet werden.

#### 1.5 Fertige Sinterprodukte

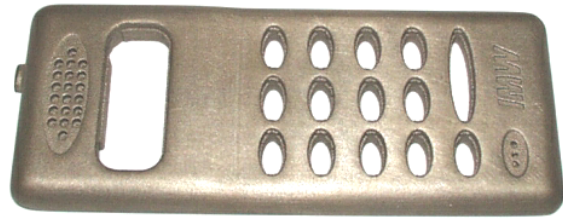
Durch den DMLS-Bauprozess können z. B. Formen für den Kunststoff- und Gummispritzguss gesintert werden, aber auch für Faserverbundbauteile. Die erreichbaren Stückzahlen der Positivteile liegen dabei zwischen einigen hundert und tausend Teilen. Dies hängt jeweils von der Komplexität der Bauteile ab.

Es ist aber auch möglich, Funktionsteile direkt herzustellen, wie z. B. Zahnräder oder Wellen.

Eine interessante Anwendung ist auch die Herstellung von Elektroden für das funkenerosive Abtragen. Zur Verbesserung des Verschleißverhaltens und der Abbildungsgenauigkeit können die gesin-

terten Elektroden noch chemisch mit Kupfer beschichtet werden.

Natürlich können aber auch Prototypen (siehe **Bild 8**) oder Anschauungsmodelle mittels Rapid Tooling hergestellt werden.



**Bild 8:** Lasergesinterte Handyschale

## 2 Zusammenfassung

Wie die Ausführungen gezeigt haben, ist unter dem Begriff Rapid Tooling nicht nur der eigentliche Sinterbauprozess sondern die gesamte Verfahrenskette zu betrachten.

Dies ist insbesondere bei Fragen zur Qualitätssteigerung der Sinterprodukte, neuen Einsatz- und Anwendungsgebieten und der Verkürzung der Fertigungszeiten zu berücksichtigen.

Zudem wird deutlich, dass die Vorstellung, aus einer beliebigen Konstruktion unmittelbar ein stoffliches Bauteil zu erhalten zur Zeit noch mit weiteren Arbeitsschritten verbunden ist.

## 3 Literatur

- /1/ EOS GmbH: Basis Training, Planegg 1999
- /2/ Trenke, D.: Anwendung von Rapid Prototyping und Rapid Tooling in der Produktentwicklung, IMW Clausthal 2001



# Einbindung von künstlichen neuronalen Netzen in einem wissensbasierten Konzept für die Feinblechkonstruktion

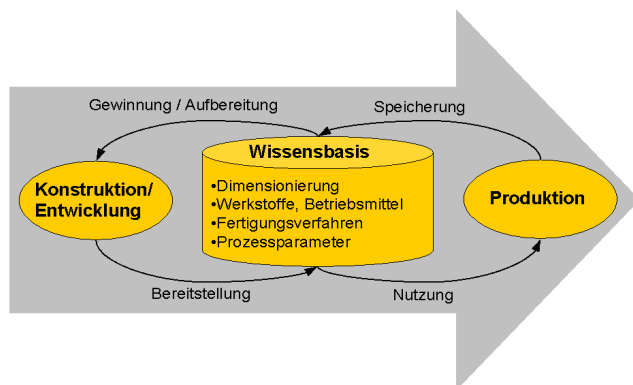
Tawil, M.

*In diesem Beitrag soll das Konzept eines Informationssystems zur Unterstützung der Feinblechkonstruktion, das im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 362 „Fertigen in Feinblech“ entwickelt wurde, kurz vorgestellt werden. Dabei werden die in diesem System zur Wissensverarbeitung und -bereitstellung eingesetzten künstlichen neuronalen Netze näher erläutert.*

*This article will present the concept behind an information system designed to aid sheet metal design that was developed within the special research project 362 "Fertigen in Feinblech". Special attention will be paid to the artificial neural networks integrated into this system for knowledge processing and knowledge supply.*

## 1 Einleitung

Es ist außerordentlich wichtig, dem Konstrukteur während der Gestaltung eines Produktes bereits Informationen zur Verfügung zu stellen, die oft erst in späteren Lebensdauerphasen dieses Produktes gewonnen werden oder aus Erfahrungen mit ähnlichen Produkten abgeleitet werden /1/.



**Bild 1:** Integrierte Produktentwicklung

Die „Kenntnisse des erfahrenen Konstrukteurs“ in wissensbasierten Systemen bereitzustellen ist eine zur Zeit im Mittelpunkt der Konstruktionsforschungen des Institut für Maschinenwesen (IMW) stehende Aufgabenstellung. Dabei bedient man sich heute das bekannte und in der Industrie immer mehr verwendete Konzept der integrierten Produktentwicklung, das in **Bild 1** vereinfacht dargestellt ist. In Anlehnung an diesem Konzept wurde am

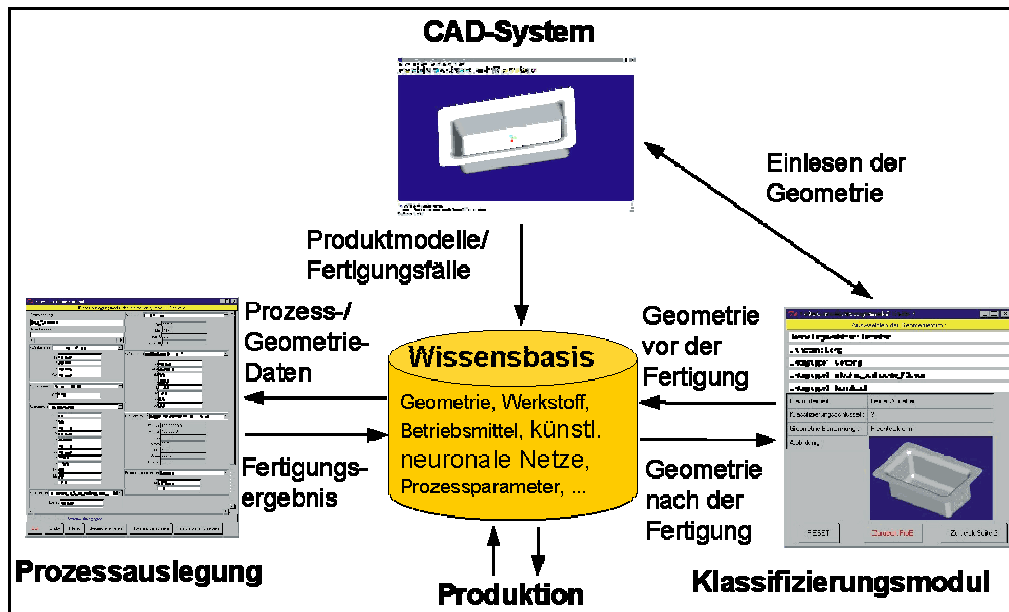
IMW der Ansatz eines Konstruktionsinformationssystems für die fertigungsgerechte Gestaltung von Feinblechen entwickelt. Im folgenden soll dieses System kurz erläutert werden. Darüber hinaus wird die darin enthaltene und ebenfalls am IMW entwickelte Methode zur Vorhersage von zurückgefederten Feinblechen nach dem Tiefziehen näher betrachtet. Diese Methode basiert auf künstlichen neuronalen Netzen, die als wissensverarbeitendes und -bereitstellendes Werkzeug in verschiedenen Gebieten ihre Anwendung gefunden haben.

## 2 Konzept des Informationssystems für Feinblechkonstruktion

Das Tiefziehen zählt zu den am häufigsten verwendeten und kompliziertesten Fertigungsverfahren und wird maßgeblich von der Bauteilgestalt, dem Werkstoff und den Prozessparametern beeinflusst. Um den Konstrukteur bei der fertigungsgerechten Gestaltung von Blechbauteilen zu unterstützen, wurde am IMW im Rahmen eines DFG-Sonderforschungsbereiches (Fertigen in Feinblech) prototypisch ein Konstruktionsinformationssystem (**Bild 2**) für die integrierte Blechteileentwicklung vorgestellt, das als Bindeglied zwischen dem CAD-System und einer Datenbasis dient. Die Datenbasis enthält die beim Tiefziehen üblichen Betriebsmittel, Geometrielemente, Werkstoffe und Prozessparameter und kann fortlaufend erweitert werden.

Nach Auswahl der Geometrielemente und des Werkstoffs werden die fehlenden prozessbezogenen Angaben wie Stempelkantenradius, Ziehkraft, Ziehgeschwindigkeit etc. festgelegt und die zum Tiefziehen benötigten Betriebsmittel vom System bereitgestellt. Die Bauteildaten werden in einer Prozessauslegungs-Oberfläche angezeigt. Bestätigt der Konstrukteur diese Angaben, werden sie in das CAD-System zum Aufbau des nun neuen 3D-Modells überführt. Darüber hinaus können, basierend auf einer im Konstruktionsinformationssystem integrierten Vorhersagemethode zur Beurteilung der Rückfederung von Tiefziehteilen mittels künstlichen neuronalen Netzen /2/, die zu erwartenden Fertigungstoleranzen berechnet werden. Liegt die Rückfederung des Tiefziehteils außerhalb der durch

die Funktion des Bauteils vorgegebenen Toleranz, so muss der Konstrukteur die Prozessangaben solange ändern, bis das System die gewünschten Ergebnisse ausrechnet.



**Bild 2:** Informationssystem für die Feinblechkonstruktion

Die so gestalteten Blechmodelle werden als Blech-Feature, die mit allen Fertigungs- und Werkstoffinformationen verknüpft sind, abgespeichert und stehen als weiteres Erfahrungswissen in der Datenbasis zugriffsbereit. Durch dieses System kann der Konstrukteur an seinem Arbeitsplatz Fertigungsdaten abfragen und seine Blechteile entsprechend auslegen. Der Fertigungstechniker kann im Umkehrschluss dieses Werkzeug nutzen, um festzustellen, wie er die Rückfederungswirkung eines vorliegenden Tiefziehwerkzeugs auf das zu fertigende Bauteil durch Änderung der Prozessparameter beeinflussen kann.

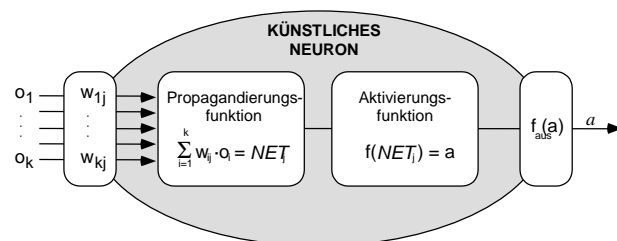
### 3 Grundlagen der künstlichen neuronalen Netze

Künstliche Neuronale Netze (KNN) sind Modelle, mit denen man versucht, einige Funktionen des menschlichen Gehirns nachzuempfinden /3/. Diese Modelle bestehen, ähnlich dem Gehirn, aus einer Vielzahl gleichartiger Elemente (Neuronen), die parallel Informationen verarbeiten. Dabei enthalten die Neuronen mathematische Funktionen (**Bild 3**), die eine bestimmte Antwort als Reaktion auf einer definierten Eingabe abbilden. Mit der Propagandierungsfunktion kann die Summe, der Maximal- oder Minimalwert der gewichteten Eingaben gebildet werden. Die Aktivierungsfunktion eines Neurons ist seine statische Kennlinie und beschreibt den Zu-

sammenhang zwischen Ein- und Ausgängen. Sie kann linear, sprunghaft (Schwellenwertfunktion) oder stetig (sigmoide Funktion) sein. Somit legt die Aktivierungsfunktion fest, wie sich aus einem Akti-

vierungszustand zum Zeitpunkt  $t$  ein Aktivierungszustand  $t+1$  berechnen lässt. Die Ausgabefunktion bildet den aktuellen Zustand des Neurons auf einen gewünschten Wertebereich ab. Die Schnelligkeit der Informationsverarbeitung innerhalb des Neuronalen Netzes liegt darin begründet, dass jedes Neuron nur eine sehr einfache Rechenoperation durchzuführen hat.

Durch die Verknüpfung der Neuronen lassen sich KNN realisieren. Dabei werden die Neuronen in verschiedenen Schichten zusammengefasst. In der Eingabeschicht werden die von außen kommenden Eingangssignale verarbeitet und an die Neuronen der versteckten Schicht weitergeleitet. Diese Neuronen werden netzintern verwaltet und unterliegen voll dem Informationsfluss, der gemäß dem gewählten Netzmodell definiert ist. Die Ausgabeschicht stellt das Ergebnis der vom Netz durchgeführten Informationsverarbeitung zur Verfügung.



**Bild 3:** Innerer Aufbau eines Neurons /4/

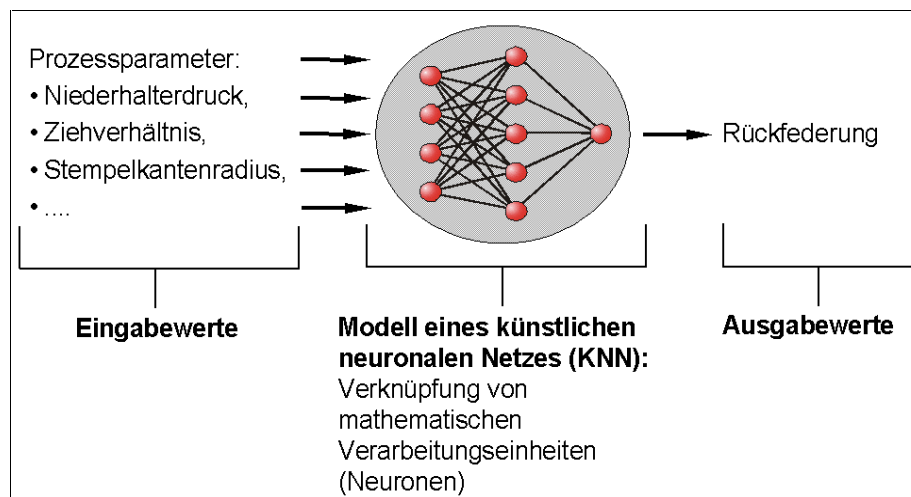
Eine der wichtigsten Eigenschaften von KNN ist ihre Fähigkeit gelernte Beispiele zu verallgemeinern und basierend darauf neue Sachverhalte zu prognostizieren. Aktuell vorliegende Probleme werden mit entsprechenden, in der Vergangenheit erfolgreich gelösten Problemen assoziiert.

Es gibt heute eine Vielzahl unterschiedlicher künstlicher neuronaler Netztypen, die nach dem gleichen, oben erläuterten, mathematischen Modell ar-

beiten. Welcher Typ bei welchem Anwendungsfall Verwendung findet, ist stets von der vorliegenden Problemstellung abhängig. Ein KNN muss immer auf die vorliegende Problematik angepasst werden. Diese Anpassung wird durch die Wahl der Netzarchitektur, der Neuronenzahl, der Eingangs- und Aktivierungsfunktion gewährleistet. So hängt die Wahl der Netzarchitektur und die Festlegung der Neuronenzahl vom Komplexitätsgrad der Aufgabenstellung ab.

#### 4 Rückfederungsvorhersage mittels künstlicher neuronaler Netze

Die Entwicklung der neuronalen Netze für die vorliegende Problemstellung „Rückfederungsvorhersage an Tiefziehteilen“ stellte eine stark iterativ geprägte Vorgehensweise dar. Zahlreiche Netztypen wurden angepasst, durchgerechnet und optimiert. Nach der Testphase mit diversen Netztypen zeigte sich das Backpropagation-Netz (Fehlerrückführung) als für die o.g. Problemstellung am geeignetsten.



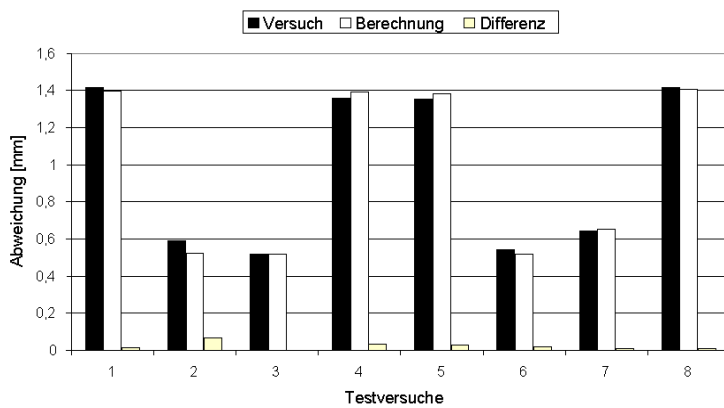
**Bild 4:** Blackbox des KNN zur Rückfederungsvorhersage

Die Arbeitsweise eines Backpropagation-Netzes kann wie folgt beschrieben werden: Die Eingabe-Neuronen antworten auf ein Eingabemuster mit Werten, die auf die Zwischenschicht-Neuronen gegeben werden. Deren Ausgänge wirken wiederum auf das oder die Ausgabe-Neuronen und erzeugen einen Output. Dieser Output wird mit dem gewünschten, vorgegebenen Soll-Wert verglichen. Hieraus wird dann die Differenz (Fehler) gebildet. Ausgehend von diesem Fehler werden die Gewichtungen der Neuronen in der Ausgangs- und Zwischenschicht verstellt [5]. Anschließend wird dem Netz ein neues Eingabemuster bereitgestellt, eine Antwort hieraus berechnet und erneut einen

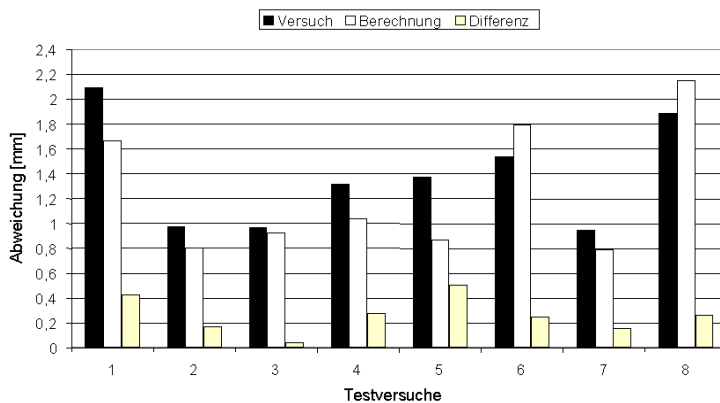
Fehler gebildet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis Output und Soll-Wert genügend nahe beieinander liegen und das Abbruchkriterium erreicht wird. Das Netz ist dann trainiert und steht für Vorhersagen zur Verfügung.

Die bei der Rückfederungsvorhersagemethode eingesetzten KNN (**Bild 4**) arbeiten nach dem gleichen Schema. Um einen repräsentativen Datensatz zum Trainieren der Netze zu erhalten, wurden zahlreiche Tiefziehversuche unter Variation der bei diesem Fertigungsverfahren üblichen Prozessparameter durchgeführt. Nach der Versuchsdurchführung und Vermessung der gefertigten Blechbauteile bezüglich Rückfederung entstand ein statistisch geprüfter Datensatz, mit dem die Netze trainiert wurden. Diesem Datensatz entnehmen die Netze, dass bei der Eingabe einer bestimmten Parameterkombination die experimentell ermittelte Rückfederung entstehen soll. Das Netz versucht nun durch Gewichtsänderungen diesen Ausgabewert (Rückfederung) zu errechnen. Mit Abschluss der Trainingsphase hat das Netz das Verhalten von Blechbauteilen bestimmter Geometrie nach dem Tiefziehen mit bestimmten Prozessparametern erlernt. Nach dem Training wurden die Netze getestet, ob die von ihnen gerechneten Ergebnisse mit denen realer Versuchen übereinstimmen. Zu diesem Zweck wurden sogenannte Bestätigungsversuche mit Parameterkombinationen durchgeführt, die den Netzen nicht bekannt sind. Anhand der Eingabewerte

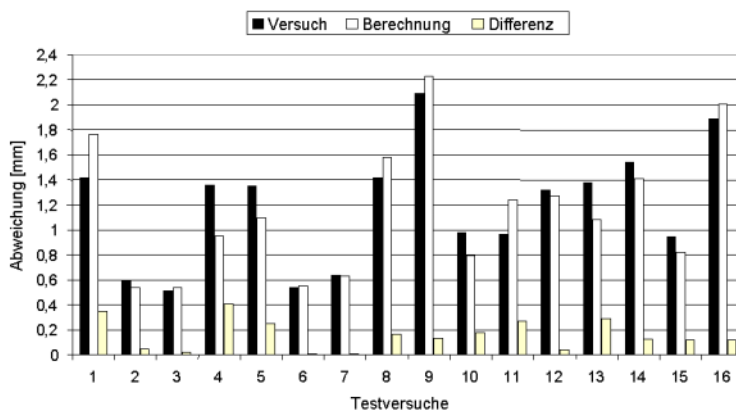
(die neuen Parameterkombinationen) berechnete das Netz die entsprechenden Rückfederungen. Die Differenz zwischen Versuchswerten und vom Netz errechneten Rückfederungen ist in **Bild 5** dargestellt. Für die Berechnung der Rückfederung in Bild 5 wurde das Netz mit einem ausreichen großen und damit statistisch abgesicherten Datensatz trainiert. Das Netz besitzt eine gute Erfahrungsbasis und damit eine sehr gute Generalisierungsfähigkeit mit minimaler Abweichung von den realen Versuchswerten. Nach der gleichen Vorgehensweise und mit den gleichen Prozessparametern jedoch mit einem kleineren Versuchsumfang wurde ein KNN für den Werkstoff H 340 der Blechstärke 0,8 mm trainiert.



**Bild 5:** Werkstoff H 340, Blechdicke 1 mm



**Bild 6:** Werkstoff H 340, Blechdicke 0,8 mm



**Bild 7:** Werkstoff H 340, Blechdicke 0,8 mm – 1 mm

Die von diesem Netz berechneten Rückfederungen stehen den experimentell ermittelten Werten in **Bild 6** gegenüber. Hier ist das Ergebnis im Vergleich zu dem in Bild 5 schlechter. Dies ist damit zu begründen, dass die zum trainieren des Netzes zu Grunde liegenden Daten nicht ausreichend waren.

In einer weiteren Untersuchung wurden die Daten beider Versuchsreihen (H 340, 0,8 mm und 1 mm) zum trainieren eines neuen KNN verwendet. Dabei wurde die Blechstärke als weiterer Parameter zu den Eingabewerten des Netzes hinzugefügt. Das Ergebnis dieser Berechnung ist in **Bild 7** darge-

stellt. Die Ergebnisgüte liegt wie erwartet zwischen der des 1 mm- und 0,8 mm-Netzes. Die durchgeführten Untersuchungen zeigen deutlich, dass künstliche neuronale Netze eine sehr hohe Genauigkeit besitzen, wenn das zum Trainieren verwendete Datensatz das zu beschreibende Sachverhalt repräsentiert. Darüber hinaus lässt sich das Eingabefeld eines Netzes unter Kaufnahme geringerer Ergebnisgenauigkeit erweitern.

## 5 Zusammenfassung

Das Konstruktionsinformationssystem für Feinblech zeigt eine Möglichkeit zur gesamtheitlichen Betrachtung und Integration aller Unternehmensbereiche insbesondere der Gestaltung und Fertigung beim komplexen Prozess „Tiefziehen“. Zum effizienten Einsatz eines solchen Systems müssen Datenmanagementsysteme und wissensbasierte Werkzeuge wie KNN zur Verarbeitung von Informationen und zur Bereitstellung von Erfahrungswissen eingebunden werden.

## 6 Literatur

- /1/ Dietz, P.; Tawil, M.: 3D-Produktmodellierung in der Entwicklungskette – Aufwand und Nutzen. VDI-Tagung "Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung 2001 - Effiziente 3D-Produktmodellierung - Fortschritte und Fallstricke" 19.-20. Juni 2001, Stuttgart, 2001
- /2/ Heinen, F.: Entwicklung einer Methodik zur Rückfederungsvorhersage an Tiefziehteilen. Dissertation, TU Clausthal. Clausthal-Zellerfeld, 1998
- /3/ Rojas, R.: Theorie der Neuronalen Netze. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1993
- /4/ Scherer, A.: Neuronale Netze. Vieweg Verlag, Braunschweig/Wiesbaden, 1997
- /5/ Haun, M.: Simulation Neuronaler Netze – Eine praxisorientierte Einführung. expert-Verlag, Renningen-Malmsheim, 1998

# Produktentwicklung auf der Basis von Systems Engineering

Düsing, C.

*Systems Engineering ist heutzutage eine Disziplin, die überwiegend in den Bereichen Luft- und Raumfahrt ihren Anwendungsbereich findet. Diese Methodik ist aber auch in anderen Bereichen erfolgreich anwendbar, wie zum Beispiel Automobil-, Bahn- oder Telekommunikationsindustrie. Dieser Artikel beschreibt, wie durch den entstehenden ISO Standard „STEP 10303 AP-233 – systems engineering“ die mangelnde Interoperabilität zwischen verschiedenen Software-Werkzeugen im Konstruktionsprozess deutlich verbessert werden kann. An einem konkreten Beispiel aus dem Gebiet des Maschinenbaus wird die Anwendbarkeit und der Nutzen illustriert.*

*Systems Engineering itself is a discipline which is most common in use in the area of aeronautics and aerospace industry. But this methodology is also applicable to other domains as automotive-, railway or telecommunication-industry. This article briefly describes how to use the emerging ISO Standard „STEP 10303 AP233 – systems engineering“ in order to resolve the incompatibility of the different software tools used in the design context. A concrete example from the mechanical engineering domain illustrates the applicability to other domains.*

## 1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten haben die Bereiche der gemeinschaftlichen Entwicklung und Konstruktion aufgrund vermehrter Anforderungen der Industrie und Kunden stark zugenommen. Heutzutage werden komplexe Produkte immer von einer bestimmten Anzahl von Unternehmen hergestellt. Dies geschieht entweder als Partner oder als Mitglied in einer komplexen Versorgungskette. Die Hauptaufgabe ist es, koordiniert und strukturiert zusammenzuarbeiten, während man mit anderen Unternehmen ständig konkurriert. Dies muß durch eine Methode unterstützt werden, die hochentwickelt und technisch ausgereift ist, um alle Aspekte eines Produktes während des ganzen Produktlebenszyklus abzudecken. Der Produktlebenszyklus, wie er in diesem Zusammenhang interpretiert wird, beginnt in den sehr frühen Entwicklungsphasen und deckt die Konstruktion, Produktion, Anwendung bis hin zum Recycling eines Produktes ab. Eine der wesentlichen Methoden, die hier zum Einsatz kommen, ist

Systems Engineering (SE). Dies kann hier definiert werden als „Ein interdisziplinärer, gemeinschaftlicher Ansatz, um eine lebenszyklisch ausbalancierte Systemlösung abzuleiten, entwickeln und zu verifizieren, welche die Kundenerwartungen erfüllt und öffentliche Akzeptanz erreicht“ (deutsche Übersetzung des IEEE Standards /1/). Die meisten Projekte, in denen diese Methode zum Einsatz kommt, sind auf dem Gebiet der Luft- und Raumfahrt angesiedelt, wie zum Beispiel das Ariane 5 oder das Eurofighter Projekt. Dennoch ist auch die Anwendbarkeit in anderen Bereichen schon mit konkreten Beispielen zu belegen, wie zum Beispiel das Tunnelbauprojekt zwischen Großbritannien und Frankreich zeigt. Bis heute scheint jedoch Systems Engineering nicht als praktikable Lösung für andere Bereiche angesehen zu werden. Ein Grund dafür könnte die mangelnde Interoperabilität von verschiedenen Software - Systemen im übergreifenden Konstruktionsprozess sein. Andererseits scheint das Wissen und die Akzeptanz dieser Methodik in einigen Industrien stark eingeschränkt zu sein.

## 2 Der Standard

Innerhalb der Arbeitsgruppe AP-233 systems engineering wird seit einigen Jahren ein ISO Standard für den Bereich des Systems Engineering entwickelt. Zum Ende des Jahres 2001 wurde von der Arbeitsgruppe das entsprechende Datenmodell als PAS (public available specification) veröffentlicht, welches nun als Grundlage für zukünftige Implementierungen dienen kann. Dieser Standard ist zunächst als reiner Datenaustauschstandard auf STEP (Standard for the Exchange of Product Data) Basis anzusehen. Auf den konkreten Inhalt des Datenmodells soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, dieser wird im Detail in /2/ beschrieben. Vielmehr essentiell ist es, zu verstehen, dass das Datenmodell, ebenso wie die eigentliche Disziplin Systems Engineering, eine Vielzahl von Methoden, Prozesse und Verfahren innerhalb unterschiedlichster Domänen, die mit der Produktentwicklung befasst sind, abdeckt.

Das Systems Engineering Datenmodell ist auf Grund seiner Architektur prozessunabhängig. Somit kann das Datenmodell auch für andere Bereiche

benutzt werden, indem der Systems Engineering Prozess durch einen anderen, spezifischen Prozess substituiert wird.

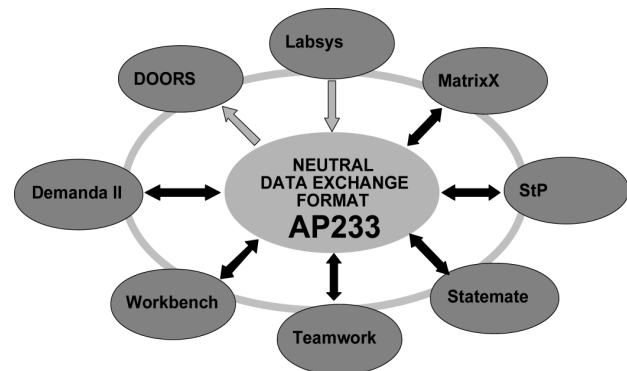
In den folgenden Abschnitten wird die Anwendung des Datenmodells an zwei Beispielen erläutert: Zum Einen wird gezeigt, wie es als zentrales Datenrepository für unterschiedliche Softwaretools, die im Systems Engineering Prozess eingesetzt werden, fungiert. Zum anderen wird an einem konkreten Beispiel illustriert, wie das Datenmodell auch in anderen Bereichen erfolgreich eingesetzt werden kann.

### 3 Schnittstellen und Einsatzmöglichkeiten

Zur Zeit werden im Rahmen des SEDRES-2 (Systems Engineering Data Representation and Exchange Standardisation-2) Projektes (siehe auch /3/) einige part 21 flat file (ISO-10303-21 – specification of a flat file based exchange) import/export Schnittstellen für unterschiedliche Softwaretools entwickelt, welche im Bereich Systems Engineering eingesetzt werden. In **Bild 1** sind die Tools, für die Schnittstellen entwickelt worden sind, dargestellt. Die hier dargestellten Tools werden in realen Systems Engineering Projekten eingesetzt. Die bidirektionalen Pfeile in der Abbildung weisen darauf hin, dass es sich dabei um import/export Schnittstellen handelt. Die unidirektionalen Pfeile (für DOORS und Labsys) zeigen, dass zur Zeit keine bidirektionalen Schnittstellen entwickelt werden, da sie in der Anwendung nicht benötigt werden. Zum Beispiel wird DOORS oftmals als traceability Tool in einer Systems Engineering Umgebung eingesetzt, so daß dort keine export Schnittstellen benötigt werden.

Diese Tools und die dazugehörigen entwickelten Schnittstellen bilden die Grundlage für zwei aus industriellen Anwendungen abgeleiteten Validierungsszenarien, welche innerhalb des SEDRES-2 Projektes durchgeführt werden. Diese Szenarien werden mit realen, industriellen Daten durchgeführt. Der Kernpunkt des einen ist die Konstruktion eines Flugzeuges, der des anderen ist die Entwicklung eines Weltraumtransporters. Im Rahmen des Flugzeug - Szenarios wird auf die Möglichkeit der zentralen Datenverwaltung des AP-233 Datenmodells eingegangen. Im **Bild 2** ist die Hauptarchitektur des sogenannten SCDS (single consolidated data set) auf Basis des AP-233 Datenmodells dargestellt. Die Basis stellt die AP-233 Datenbank dar, welche praktisch als Container für alle Daten, welche im Systems Engineering Prozess benutzt werden, dient. Die Daten, welche von den unterschiedlichen

Software - Werkzeugen stammen, werden in part 21 Dateien abgelegt. Diese Dateien werden als Anhang einer email an den SEDRES – Server gesendet. Diese Dateien werden dann an den Konsolidator weitergeleitet. Die Hauptaufgaben des Konsolidators können im Wesentlichen wie folgt beschrieben werden: Die eintreffenden Dateien werden bezüglich ihrer Konformität mit dem AP-233 Datenmodell überprüft. Die nicht übereinstimmenden Dateien werden abgelehnt und an den Absender mit einer Fehlerbeschreibung zurückgesendet. Die wichtigste Aufgabe des Konsolidators ist es, die ankommenden Daten, die von verschiedenen Werkzeugen und Benutzern stammen, zu verwalten. Dies bedeutet, dass ein Mechanismus implementiert werden muss, welcher auf Grundlage wesentlicher Regeln automatisch entscheidet, ob ankommende Daten bereits existierende Informationen dupliziert oder aktualisiert oder gegebenenfalls ersetzt werden. Zur Zeit führt der SEDRES Konsolidator fundamentale Aufgaben auf der Grundlage folgender Regeln durch:



**Bild 1:** Überblick über die unterschiedlichen Schnittstellen und Werkzeuge

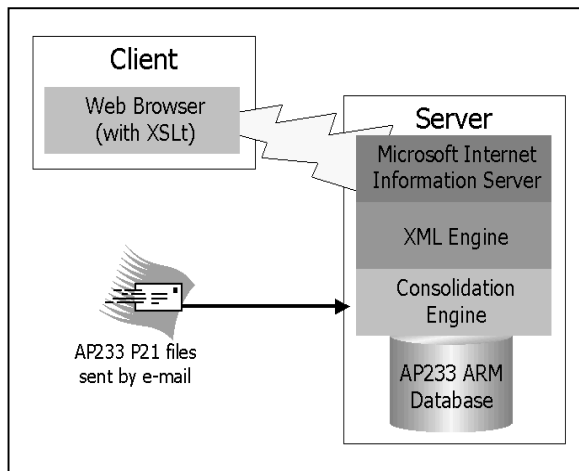
- Jede Information, die AP-233 interne Objekte für einheitliche Kennzeichnung benutzt, überschreibt existierende Informationen.
- Jede Information, die AP-233 interne Objekte für Versionshaltung benutzt, wird als neue Information interpretiert und zur Datenbank hinzugefügt.
- Jegliche andere Information, entweder duplizierend oder neu, wird in der Datenbank repliziert, da es für diesen Prozess keine Automatisierungsmechanismen zur Überprüfung gibt.

Als Clients für den SEDRES-XML Server kann jeder konventionelle Webbrowser, zum Beispiel Netscape oder Internet Explorer mit XML (eXtensible Markup Language) Funktionalität dienen. Diese Clients können die Datenbank mit ASP (Active Ser-



ver Pages) Anfragen abfragen. Der Server liefert die angeforderte Information im XML Format zurück. Um die Daten benutzerfreundlich aufzubereiten, werden XML-Stylesheets (XSLt) benutzt.

Hauptziel der Durchführung dieses Validierungs-



**Bild 2:** Architektur des AP-233 – XML Server

szenarios wird einerseits die Validierung des AP-233 Datenmodells sein. Ausserdem wird die Anwendbarkeit in einer realen Arbeitsumgebung untersucht und verbessert werden.

Im folgenden Abschnitt soll exemplarisch gezeigt werden, inwieweit das Datenmodell in anderen Bereichen angewendet werden kann.

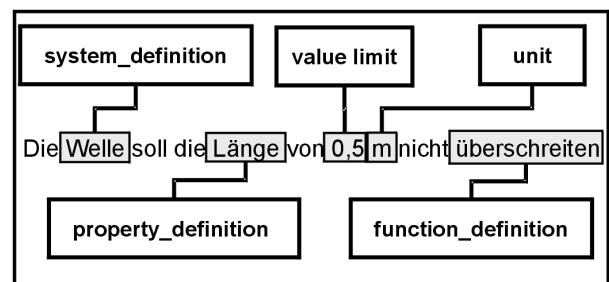
#### 4 Anwendbarkeit in anderen Bereichen

Das Systems Engineering Datenmodell ist durch seinen hohen Überdeckungsgrad mit anderen Bereichen ebenso für andere Domänen relevant. In diesem Abschnitt wird die Anwendbarkeit des Datenmodells an einem konkreten Beispiel aus dem Bereich des Maschinenbaus exemplarisch erläutert.

Das hier vorgestellte Beispiel stammt aus der frühen Konstruktionsphase einer Welle-Nabe-Verbindung. Solche Verbindungen sind praktisch in der gesamten Antriebstechnik zu finden. Die Forschung über Welle-Nabe-Verbindungen gewinnt zur Zeit immer mehr an Bedeutung. Die ständig wachsenden Ansprüche der Industrie und der Nutzer führen zu einer hohen Anzahl von Anforderungen an solche Verbindungen. Die Konstrukteure von Welle – Nabe - Verbindungen müssen all diese Anforderungen verwalten, zuordnen, priorisieren und zuletzt auch erfüllen, ohne dabei die Übersicht zu verlieren. Das Beispiel stellt den Ansatz dar, die Anforderungen in einem Anforderungsmanagementtool zu erfassen und zu verwalten sowie parallel die Konstruktion in einem CAD Tool durchzuführen.

Zu Beginn werden in der Regel die Anforderungen an die Verbindung von dem Konstrukteur erfasst und in textueller Form abgelegt. Wesentliche Anforderungen wie zum Beispiel Gewicht, Ausmaße, Drehmomentübertragung etc. werden hierbei in der Regel als Anforderungsliste oder Lastenheft dokumentiert. In der letzten Zeit gehen immer mehr Unternehmen dazu über, Anforderungserfassung, -analyse und -management rechnerunterstützt mit Softwarewerkzeugen durchzuführen. Das in diesem Beispiel verwendete Werkzeug *demanda II* wurde am Institut für Maschinenwesen entwickelt und wird zur Zeit innerhalb des Institutes eingesetzt und weiterentwickelt.

*demanda II* selbst ist vollständig AP-233 basiert, d.h. das AP-233 Datenmodell wird als interne Datenbank für das Werkzeug verwendet. Somit können alle Objekte und deren Attribute, also die komplette Funktionalität des Datenmodells, instanziiert und verwendet werden.

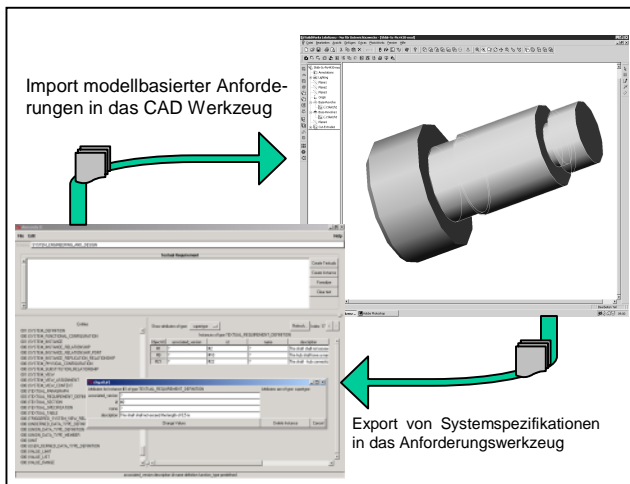


**Bild 3:** Formalisieren von Anforderungen

Nach der Erfassung der Anforderungen in textueller Form werden diese „formalisiert“. Mit dem Prozess „Formalisieren“ ist in diesem Zusammenhang gemeint, dass textuelle Anforderungen in modellbasierte Anforderungen transformiert werden. Das Modell, welches hierfür benutzt wird, ist eben das Systems Engineering Datenmodell. Dieser Prozess wird durchgeführt, indem Wörter oder Phrasen der textuellen Anforderungen auf Objekte und Attribute des Datenmodells abgebildet werden und dieses dementsprechend instanziiert wird. **Bild 3** verdeutlicht diesen Prozess des Formalisierens an einer konkreten Anforderung aus der Konstruktion einer Welle – Nabe - Verbindung. Als Beispiel wird hier ein Objekt *system\_definition*, (welches ein System oder Untersystem im AP-233 Datenmodell beschreibt) für die Welle instanziiert. Es wird somit jeweils für jedes Objekt in der textuellen Anforderung eine neue Definition erstellt oder eine existierende Definition wiederverwendet. Mindestens eine Instanz und ein eindeutiges Identifizierungsobjekt wird automatisch für jede Definition erzeugt, so



dass jede Komponente eindeutig identifizierbar ist. Heutzutage sind gebräuchliche CAD Werkzeuge noch nicht mit Schnittstellen zum AP-233 Datenmodell ausgestattet, so dass der folgende Abschnitt lediglich eine wünschenswerte Verwendung des Datenmodells im Konstruktionsprozeß darstellt, indem geometrische Anforderungen in CAD Werkzeugen bearbeitet werden. Wie in **Bild 4** gezeigt wird, kann die erste Version einer Spezifikation beruhend auf den modellbasierenden Anforderungen in ein CAD Werkzeug importiert werden. Somit ist der Konstrukteur in der Lage, Teile des Systems direkt in seiner gewohnten CAD Umgebung unter Verwendung der geometrischen Anforderungen aus dem Anforderungswerkzeug zu bearbeiten und zu erstellen. Dies ermöglicht es dem Konstrukteur, die Erfüllung der geometrischen Anforderungen direkt in dem CAD Werkzeug zu kontrollieren und zu überwachen. Für den Konstrukteur ist es deutlich einfacher, geometrische Anforderungen in seiner gewohnten CAD Umgebung zu bearbeiten, als in Dokumenten, in denen schnell die Übersicht über eine große Anzahl von Anforderungen verloren gehen kann.



**Bild 4:** Datenaustausch zwischen CAD und Anforderungswerkzeug

Um das System detaillierter zu spezifizieren, wird bei großen Projekten ein Anforderungsbearbeiter die Anforderungen verfeinern und herunterbrechen. Dies ist nun direkt basierend auf der geometrischen Repräsentation der Anforderungen aus dem CAD Werkzeug, welche wieder in das Anforderungswerkzeug importiert werden können.

Da in diesem Fall das Anforderungswerkzeug *demanda II* direkt AP-233 basiert ist, können nun wesentliche Funktionalitäten des Datenmodells verwendet werden. Wichtige Punkte sind in diesem Zusammenhang nun Versionshaltung und Konfigu-

rationsmanagement. Dies erlaubt dem Anwender, den Prozeß der Verfeinerung und Modifikation der Anforderungen zu wiederholen, ohne die Kontrolle über den Prozess zu verlieren. Die Gründe für Veränderungen von Anforderungen oder der Systemspezifikation können innerhalb des Werkzeuges in sogenannten justification Objekten erfasst und überwacht werden. Somit ist eine vollständige Nachvollziehbarkeit jeder Aktion oder Modifikation unabhängig vom Werkzeug, in dem dieses durchgeführt wurde, garantiert.

Anhand dieses Beispiels konnte ein Einblick in die Möglichkeiten der Anwendbarkeit des AP-233 Systems Engineering Datenmodells auf einen Konstruktionsprozeß im Bereich des Maschinenbaus gegeben werden. Obwohl diese einführende Darstellung in Bezug auf die Möglichkeiten hier stark eingeschränkt ist, kann dennoch illustriert werden, wie das Datenmodell auf andere Bereiche angewendet werden kann, denn es deckt zahlreiche Aspekte ab, welche in einer großen Anzahl von Domänen genutzt werden. Weitere Möglichkeiten, welche das Datenmodell bietet sind in anderen Publikationen, z.B. /4/ detaillierter erläutert.

## 5 Zusammenfassung

Dieser Artikel gibt einen Überblick über den aktuellen Status des Systems Engineering Datenmodell und die entsprechenden internationalen Standardisierungsaktivitäten. Weiterhin wurde ein Einblick in die Validierung des aktuellen Datenmodells gegeben. Weitere Möglichkeiten der Anwendung und Ausweitung auf andere Bereiche wurde an einem konkreten Beispiel aus dem Bereich des Maschinenbaus gezeigt.

## 6 Literatur

- /1/ IEEE 1220-1994 (1995); *IEEE Trial-Use Standard for Application and Management of the Systems Engineering Process*, IEEE Computer Society Press
- /2/ Johnson, J., Giblin, M. and E. Herzog (2001): *The technical data coverage of the emerging AP-233 STEP Standard and its use in virtual enterprises*, Proceedings of the PDT Europe conference, pp. 203 – 212, Brüssel
- /3/ [www.sedres.com](http://www.sedres.com), 2001
- /4/ Heimannsfeld, K., Herzog, E., Johnson, J. and C. Düsing (2000): *Beyond Tool Exchanges – Current Status and Future Implications of the Emerging ISO Standard AP-233*, Proceedings of the EUSEC conference 2000, München

# Informations- und Kommunikationstechniken als Hilfsmittel für die Normung

Müller, N.

*Die Normung steht wie die Industrie und Wirtschaft unter einem erheblichen Druck.*

*Dabei ergeben sich durch die Entwicklung neuer Kommunikations- und Informationstechniken beachtliche Möglichkeiten zur Veränderung und Rationalisierung der Normungsarbeit in Normungsorganisationen und in der innerbetrieblichen Normung.*

*The standardization stands as industry and economy under a considerable pressure.*

*By means of development of new communication- and information techniques essential possibilities for changing and rationalization of the standardization work in standardization organization and in the internal standardization by the development.*

## 1. Einleitung

Dieser Artikel ist aus Teilen des Berichtes „Normung in Industrie und Wirtschaft im Jahre 2010 Standortbestimmung und Handlungsbedarf“ /1/ entstanden, der auf Initiative des ANP-Beirats (Arbeitsausschuss Normenpraxis) erarbeitet wurde. Ziel des Berichtes ist es, die aktuellen Probleme im Umfeld der Normung aufzuzeigen und in einer IST-Analyse (Bestandsaufnahme) darzustellen.

Darüber hinaus wurden in mehreren Projektgruppen Ansätze zur Verbesserung der Situation im Umfeld der Normung systematisch aufgearbeitet und in Form von erforderlichen Handlungsfeldern zusammengestellt.

Aus diesen Handlungsfeldern wurden konkrete Maßnahmen abgeleitet, die es ermöglichen sollen, daß Ziel des gewünschten Zukunftsszenarios „Marktgerechte Normung unterstützt die wirtschaftliche Entwicklung“ zu erreichen.

Besondere Schwerpunkte sind:

- Strategische Managementmodelle zur Standardisierung zu erarbeiten.
- Moderne Kommunikationstechniken und DV Anwendungen als Werkzeuge in der Normung einzusetzen.

- Hochschulen und Universitäten stärker in das Normungsumfeld einzubinden.
- Normungskenntnisse als Bestandteile der Managementausbildung auszuarbeiten.
- Eine verstärkte Öffentlichkeitsarbeit zu betreiben.

## 2. Spannungsfeld der Normung

Industrie und Wirtschaft stehen durch die Veränderungen am Markt, nicht zuletzt durch die Globalisierung der Weltmärkte, unter einem erheblichen Druck. Dabei ist diese Veränderung ein stetiger Prozeß, der allerdings an Geschwindigkeit ständig zunimmt. Besonders für die deutsche Wirtschaft ist es wichtig, sich dieser Herausforderung zu stellen und strategisch für die neuen Marktbedingungen zu positionieren. Nicht nur, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können, müssen Unternehmen immer schneller neue und innovativere Produkte entwickeln, die einem höheren Qualitätsstandard entsprechen und zugleich kostengünstiger und umweltverträglicher sind. Ein besonderes Gewicht liegt deshalb auf der Verbesserung der Produktfindung und Entwicklung in den Unternehmensbereichen Konstruktion und Entwicklung.

Dieser „Druck“ und der ständige Wandel in Industrie und Wirtschaft wirkt sich direkt auf die Unternehmensstrukturen aus, beeinflusst somit Konstruktion und Entwicklung und auf diese Weise auch die Normung und deren innerbetriebliche Prozesse.

Insbesondere aufgrund der Entwicklungsrichtungen:

- Kosteneinsparungen und Abbau von Personal
- Outsourcing und Konzentration auf Kernfelder
- Unkenntnis über Normungsprozesse, Normungspotential und mögliche Normungsstrategien für den Marktzugang von Produkten
- Kurzfristiges Erfolgsdenken

wird der Druck auf die innerbetriebliche Normung sehr groß.

Dieses Spannungsfeld sollte aber nicht, wie so oft, zur reinen Reduzierung bzw. zur Vernachlässigung der Normung führen, sondern Anlaß sein, die Möglichkeiten und Chancen zur Neugestaltung der strategischen Ausrichtung der Normung zu ergreifen zur Unterstützung der Unternehmensziele. Denn hier liegt ein Potential vor, das insbesondere im Hinblick auf Produktionskosten und Marktzugang, oft nicht erkannt bzw. unterschätzt wird.

Normung darf nicht als Selbstzweck verstanden werden, sondern muß immer eingebunden sein in die Unternehmensstrategie und den gesamten Konstruktions- und Entwicklungsprozeß, bis hin zur Realisierung und den Vertrieb von Produkten und auch von Dienstleistungen!

So muß sich auch die innerbetriebliche Normung und deren Umfeld den neuen Entwicklungsrichtungen von Industrie und Wirtschaft anpassen, ja sie sogar im besonderen Maße unterstützen und fördern. Auch die Normung muß in diesem Sinne unternehmerisch tätig werden und eine zuweilen anzutreffende Passivität ablegen!

In **Bild 1** sind die Entwicklungsrichtungen in der Industrie und Wirtschaft dargestellt.

### 3. Bedeutung der Normung

Bei der Erzielung von Wettbewerbsvorteilen haben Standards und Normen eine wichtige Rolle, da sie ein Instrument sind, um Vorteile zu schaffen und auszubauen. Exportintensive Wirtschaftszweige nutzen die Normung als eine Strategie, um sich Weltmarktanteile zu erschließen und zu sichern.

Bisherige betriebs- und volkswirtschaftliche Schätzungen gingen von einem Kosten/Nutzen-Effekt der Normung in Höhe von ca. 15 Mrd. Euro pro Jahr aus.

Daraus kann die Schlußfolgerung gezogen werden, daß in fast allen untersuchten Branchen die Anzahl der Normen insgesamt einen positiven Einfluß auf die Entwicklung der Innovationen haben./2/

## Entwicklungsrichtungen in der Industrie und Wirtschaft

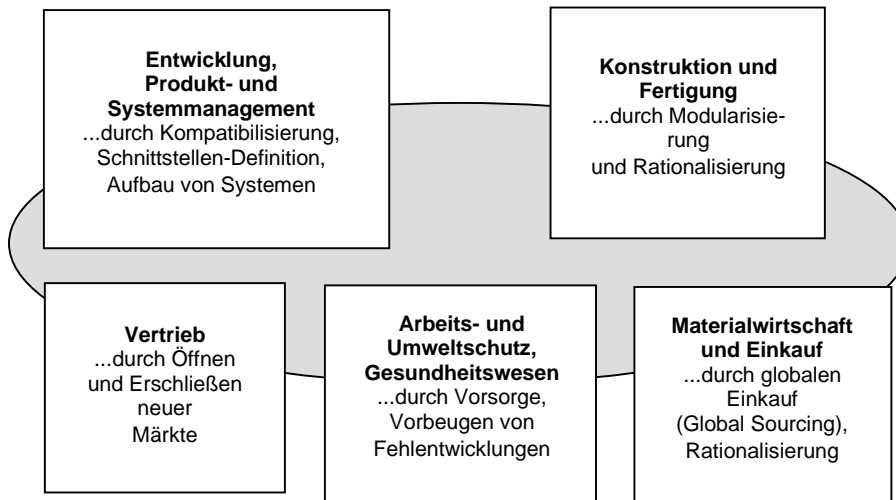


**Bild 1:** Entwicklungsrichtungen die Unternehmen mit direkten Einfluß auf die Normung

Insgesamt spielen Normen und technische Regeln mit ihrer Katalysatorwirkung für die Diffusion neuen technischen Wissens eine wichtige Rolle im Innovationssystem der Bundesrepublik Deutschland. Innovationspolitische Maßnahmen sollten deshalb ganzheitlicher ausgerichtet sein, auch Schnittstelle zwischen Innovationen und deren effizienter Diffusion durch Normen berücksichtigen und Initiativen wie die der entwicklungsbegleitenden Normung weiter entwickeln und stärken.

Aber auch bei anderen innovationspolitischen Maßnahmen zur Förderung neuer Technologien ist unmittelbar der Aspekt der Verbreitung zu berücksichtigen. Das **Bild 2** zeigt auf, welche Unternehmensbereiche von Normung und der Einflußnahmen auf Normungsprozesse profitieren können.

Der Wert der Normung als strategisches Instrument, zum Beispiel bei der Öffnung neuer Märkte, wird von vielen noch nicht in vollem Umfang erkannt. In der folgenden **Tabelle 1** sind die möglichen strategischen Vorteile zusammengestellt. /3/

**Bild 2:** Der strategische Nutzen der Normung /3/

- erleichtert wirtschaftliche und technische Kooperation
- ermöglicht wirtschaftlichen Einsatz von Arbeit, Energie, Material
- ist Voraussetzung für Rationalisierung und Beherrschung von Vielfalt
- eröffnet Zugang zu technisch aktuellen und gesicherten Lösungen
- fördert den Wettbewerb – „Stand der Technik“ wird allen zugänglich
- steigert die Qualität der Produkte, Dienstleistungen und Verfahren
- schafft Produktsicherheit, schützt Umwelt und Gesundheit
- kann Forschung und Entwicklung erleichtern
- vereinfacht das öffentliche Auftragswesen
- kann den Zugang zu neuen Märkten öffnen
- kann Märkte abschotten

**Tab.:1 Mögliche strategische Vorteile /3/**

Des weiteren müssen die Informationsmöglichkeiten verbessert und der Zugriff auf Informationen über Normung vereinfacht werden.

#### 4. Hemmnisse bei der Erarbeitung von Normen

Folgende Faktoren führen mitunter dazu, daß die Entscheidungsträger in Unternehmen sich gegen eine Beteiligung an Normungsprojekten entscheiden:

- Zu langer Normungsprozeß
- Ergebnis des Normungsprozesses zu unsicher
- Konsensbildung kontra

#### Qualität der Norm

- Kostenbeitrag zu Normenausschüssen (beim DIN)
- Kosten des Normungsprozesses nicht kalkulierbar
- Fachliche und personelle Belastung nicht einschätzbar
- Mangelnde Kenntnis des Normungsprozesses in Management und Fachabteilung
- Bei europäischer und internationaler Normung
  - Sprachbarriere
  - Kostenintensiv (Auslandsreisen)
  - Nationale Abstimmungen mit Spiegelgremium
  - Delegationsprinzip
  - Andere Normungsphilosophie
  - Andere Regelungsbreite und -tiefe
  - Komplexität der Sachverhalte und deren Gliederung
- Europäische Normungsorganisationen und insbesondere auch nationale Normungsorganisationen sind unzureichend auf den sich gegenwärtig vollziehenden Wandel in der Normung vorbereitet
- Mangelnder Einsatz moderner Kommunikationstechniken
- Das Informationsmanagement in Normungsorganisationen ist neben der Effizienz der Normungsarbeit verbesserungsbedürftig.
- Doppelarbeit zum Teil in unterschiedlichen Organisationen
- Mangelnde Abstimmung aufgrund fehlender Kenntnisse der Bearbeitungsstände
- Mangelnde Kenntnisse über Strategien im Normungsprozeß

- Mangelnde Qualifikation der Mitarbeiter
- Zu häufig wechselnde Mitarbeiter im Normenausschuß
- Branchenspezifische Interessenvertretung in Normenausschüssen
- Zur Zeit gibt es für Normungsvorhaben keine Projektarbeit und damit auch:
  - Keine Zielvorgaben (Zeit, Kosten, Inhalt)
  - Keine Kompetenz im Projektmanagement
  - Mangelnde Ausbildung und Erfahrung in Projektarbeit
  - Mangelnder Budgetrahmen
  - Kein festgelegter Abschlußtermin
  - Mangelnde Ergebnisse im Projektfortschritt
  - Teilergebnisse entsprechend des Projektfortschritts werden nicht öffentlich zur Diskussion gestellt
  - Keine Kriterien für einen Projektabbruch und die Qualität der Ergebnisse

Es gilt, die oben geschilderten Hemmnisse so weit wie möglich abzubauen und so allen interessierten Kreisen die Teilnahme an Normungsprojekten zu ermöglichen. Nur so kann sichergestellt werden, daß Normen produziert werden, die den Bedürfnissen aller interessierten Kreise entsprechen und eine weitreichende Akzeptanz finden.

**Tabelle 2** zeigt einen Teil des erforderlichen Handlungsbedarfs zum Abbau von Hemmnissen bei der Erarbeitung von Normen

- |  |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erarbeitung eines Leitfadens zur Transparenz der Normungsarbeit</li> <li>• Bereitstellung und Zugriff auf alle Normungsvorhaben und zugehörigen Dokumente (international, regional, national)</li> <li>• Projektdatenbank</li> <li>• Anpassung der Metanormen (z.B. DIN 820) zur Erarbeitung von Normen (international, regional, national), um die Nutzung der neuen Kommunikations- und Informationstechniken zu ermöglichen (virtueller Normenausschuß).</li> <li>• Offenlegung der Teilnehmer in Normenausschüssen auf internationaler, regionaler und nationaler Ebene (unter Berücksichtigung des Datenschutzes).</li> <li>• Ähnliche Maßnahmen sollten auch bei anderen Regelsetzern wie z. B. VDI, VDMA eingeleitet werden.</li> <li>• Aufbau von Projektarbeit für Normungsvorhaben</li> </ul> |
|--|

## 5. Informations- und Kommunikationstechniken

Besonders die Informations- und Kommunikationstechniken haben die Arbeitsweisen in Industrie und Wirtschaft stark verändert.

Dazu zählen die Veränderungen durch die Computertechnologie, Netzwerktechnik, Datenbanksysteme, CAD, integrierte Softwarelösungen, Datenaustausch und nicht zuletzt die Internet- und Intranettechnologie. Mit diesen veränderten Arbeitsweisen haben sich und werden sich die innerbetrieblichen Abläufe und Struktur, wie auch die Normungsarbeiten in den Organisationen, weiterhin verändern.

In der Vorbereitung und an der Schwelle zur industriellen Anwendung sind zur Zeit Techniken wie:

- Anwendungen im WWW (World Wide Web) mit Internetanwendungen zur verbesserten Informationsbeschaffung und Kommunikation mit Kunden und Zulieferanten.
- Intranet- und Extranetanwendungen zur besseren Kommunikation im Unternehmen intern und extern.
- Daten Management Systeme bzw. Produktdaten Managementsysteme zur Produktdatenhaltung und Verwaltung.
- Elektronische Aufbereitung von Katalogen und Bibliotheken.
- Datenbankapplikationen zur besseren Datenhaltung bzw. Informationsbereitstellung.
- Einführung von Videosystemen zur verbesserten Kommunikation.
- Integration der technischen DV-Systemen in die betriebliche Organisation.
- Nutzung der Web-Technologien wie z.B. CORBA-Anwendungen für verteilte Systeme.
- Präsentationstechniken
- Videoprojektion
- Multimediakonzepte
- Nutzung von Hochgeschwindigkeitsnetzen

**Diese Informationstechniken sind in Zukunft verstärkt in die Normungsarbeit einzubinden.**

**Tab. 2: Handlungsbedarf Normung (1)**

Auch in nächster Zukunft werden sich diese Techniken dynamisch weiterentwickeln.

So sind Techniken geplant wie:

- Ganzheitliches Produktmodell zur besseren unternehmerischen Integration,
- Life-Cycle-Engineering, Nutzung eines Produktmodells im gesamten Produktlebenszyklus,
- Methoden der künstlichen Intelligenz zur besseren Entscheidungsunterstützung,
- Global Engineering Networking,
- Hypermedia-Informationssysteme
- Workflow-Systeme zur Steuerung, Koordinierung, Überwachung und Verfolgung des Arbeitsflusses.
- e-Business
- Aufbau von kompletten digitalen Produktmodellen mit geometrischen, administratorischen und wirtschaftlichen Daten

Besonders die Entwicklung des WWW und die Anwendung von Web-Technologien verändern zur Zeit die Normung stärker und schneller als die Einführung von CAD und Datenbanken in der Vergangenheit. Programmierplattformen wie JAVA, hardwareunabhängige Infrastrukturen von Objekten mit Hilfe von CORBA und erweiterte OLE-Funktionalität bzw. XML in Verbindung mit Web-Browsern und Web-Server als Basis werden Grundbausteine zukünftiger Entwicklungen der Informationstechnik im Umfeld einer Normung sein.

Die Weiterentwicklung und Umstellung der verschiedensten digitalen Techniken zur Erreichung der Forderungen nach kürzeren Entwicklungszeiten, verbesserter Entwicklungsqualität und informationstechnische Verknüpfung der Einzelaufgaben in eine Prozeßkette wird weiterhin eine der wichtigsten Herausforderungen zur Erreichung der unternehmerischen Ziele bleiben.

Die konsequente Nutzung der Internettechnologie eröffnet diesbezüglich völlig neue Möglichkeiten:

- Es wird mehr Transparenz im Normungsprozeß gewährleistet. Die konsequente Anwendung moderner Kommunikationsmittel, insbesondere des Internets, gibt Normungsorganisationen die Möglichkeit, die interessierten Kreise quasi in Echtzeit über den Stand eines Normungsprojektes zu informieren. Hierdurch wird den interessierten Kreisen eine verbesserte Kontrolle des Normungsprozesses gewährt. Es fällt Teil-

nehmern wie auch Beobachtern des Normungsprozesses erheblich einfacher, frühzeitig auf etwaige Fehlentwicklungen hinzuweisen.

- Die Teilnehmer an einem Normungsprojekt werden von der (kostspieligen) Reisetätigkeit, die mit dem "traditionellen" Normungsprozeß einhergeht, entbunden und können an ihrem Arbeitsplatz verbleiben. Dies erleichtert Unternehmen und anderen interessierten Kreisen aufgrund eines erheblich verringerten finanziellen Aufwandes die Entscheidung für die Teilnahme an einem Normungsprojekt.
- Der Normungsprozeß läßt sich effizienter gestalten als bisher. Häufig ist es nicht erforderlich, daß alle Teilnehmer über die gesamte Dauer des Normungsprozesses anwesend sind. Mit Hilfe des Internets ist es möglich, daß die Teilnehmer an einem Normungsprozeß sich präzise dann einschalten, wenn es für das Projekt notwendig ist. Man kann insofern von einer Dynamisierung der Teilnahme an einem Normungsprojekt sprechen. Dies bewirkt eine Verschlinkung des Normungsprozesses; dessen Teilnehmer wenden gerade soviel Zeit für ein Normungsprojekt auf wie nötig.
- Die Dynamisierung der Teilnahme an einem Normungsprojekt hat eine Reihe weiterer Vorteile: Zu einem bestimmten Zeitpunkt des Normungsprozesses sind gerade die Teilnehmer unmittelbar involviert, die für eine effiziente Arbeit nötig sind. Da also die Anzahl der unmittelbar involvierten Teilnehmer i.a. kleiner ist als bei "klassischen" Normungsprojekten, wird nicht nur die Konsensfindung erleichtert, es erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit heimlicher Absprachen ("Kollusionen"). Diesem Problem wird aber effektiv dadurch begegnet, daß die interessierten Kreise die Normungsarbeit per Internet überwachen und auf eventuelle Fehlentwicklungen unmittelbar reagieren können.

Die Bereitstellung der Ressourcen für eine internetbasierte Normungsarbeit ist eine Dienstleistung, für die sich Normungsorganisationen unmittelbar anbieten. In organisatorischer Hinsicht ist es beispielsweise denkbar, jedem Technische Komitee einen "Webmaster" zu Seite zu stellen, der den Verlauf der Normungsarbeit unmittelbar im Internet veröffentlicht. Gelingt es den Normungsorganisationen, die Möglichkeiten moderner Kommunikationsmittel für die Normungsarbeit in

Zukunft voll auszuschöpfen, so sollte dies deren Wettbewerbsfähigkeit gegenüber anderen Formen der Normung (z.B. in der Marktsphäre oder durch Konsortien) erheblich verbessern.

Die moderne Informations- und Kommunikationstechnologie könnte die Normungsarbeit revolutionieren. Voraussetzung für das Funktionieren des oben geschilderten Ansatzes ist jedoch, daß auch die interessierten Kreise ausgiebig Gebrauch von den Möglichkeiten des Internets in der Normungsarbeit machen. Für das Normungsmanagement ist es aus den oben genannten Gründen unabdingbar, hiermit vertraut bzw. "up to date" zu sein. Die Manager in Industrie und Wirtschaft sowie die nationalen und europäischen Normungsorganisationen müssen im Rahmen von Seminaren mit den modernen Informations- und Kommunikationstechnologien vertraut gemacht werden. In der **Tabelle 3** ist der notwendige Handlungsbedarf „Normung“ aus der Sicht von Informations- und Kommunikationstechniken zusammengestellt.

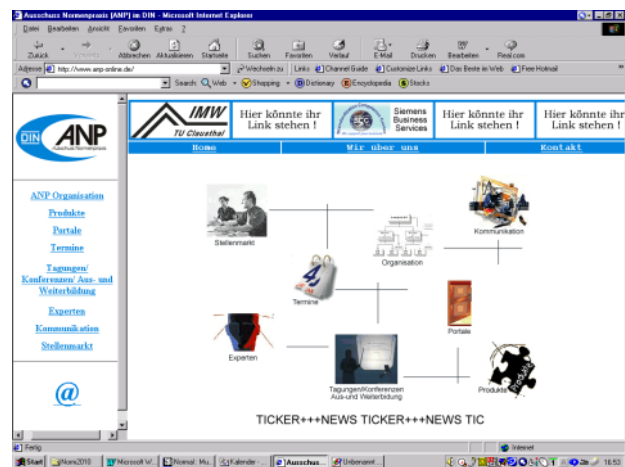
- Diskussionsforum im WWW
- Virtueller Normenausschuß und Virtuelles ANP-Mitglied
- Virtuelle Abstimmungen im Netz
- E-Mail-Verteiler
- Multimedia: z.B. Video-Konferenzen
- Informationsbereitstellung im WWW
- Unternehmensintranet zu Themen der Normung
- Elektronische Kataloge und Bibliotheken
- Aufbau eines zentralen Merkmal-Lexikons
- Leitfaden für die Nutzung der Kommunikationstechnik in der Normung
- Einrichtung einer ständigen Projektgruppe Kommunikationstechnik
- Aufbau einer Datei mit normungsrelevanten Links
- Aufbau von Suchmaschinen für Normungsinformationen im Netz

**Tab. 3: Handlungsbedarf Normung (2)**

## 6. Die Normenorganisationen im WWW

Eine erster Schritt zur Verbesserung der Transparenz über Normungsvorhaben ist bereits dadurch eingetreten, daß die wichtigsten Normenorganisationen mit einem Portal im World Wide Web vorhanden sind: **Bild 3** zeigt das Portal des ANP ([www.anp-online.de](http://www.anp-online.de)) mit Informationen zu weiteren Portalen, Termine, Tagungen, Konferenzen und Aus- und Weiterbildung. Geplant ist der Aufbau einer Experten- und Stellenmarktdatenbank.

Zunehmend werden bereits passwortgeschützter Bereich auch Arbeitspapiere in das Internet gestellt, allerdings ist dann der Zugriff darauf nur den unmittelbar Beteiligten vorbehalten.



**Bild 3:** ANP Portal im Netz ([www.anp-online.de](http://www.anp-online.de))

Ein Gremium, welches die Anliegen der Nutzer solcher Websites kommuniziert und Verbesserungen der Transparenz von Normung anstrebt, besteht in dem Sonderausschuß des ANP-Beirates "Beratungsgremium DIN im Internet".

Durch die Einführung von „Livelink“ hat das DIN einen wesentlichen Schritt zur Verbesserung der Ausschussarbeit getan. „Livelink“ ist ein sogenanntes „Wissen-Management-System“ auf Basis von „Open Text“ mit deren Hilfe die in den Ausschüssen anfallenden Dokumente im Internet verwaltet und bereitgestellt werden. **Bild 4** zeigt die Benutzeroberflächen von „Livelink“.



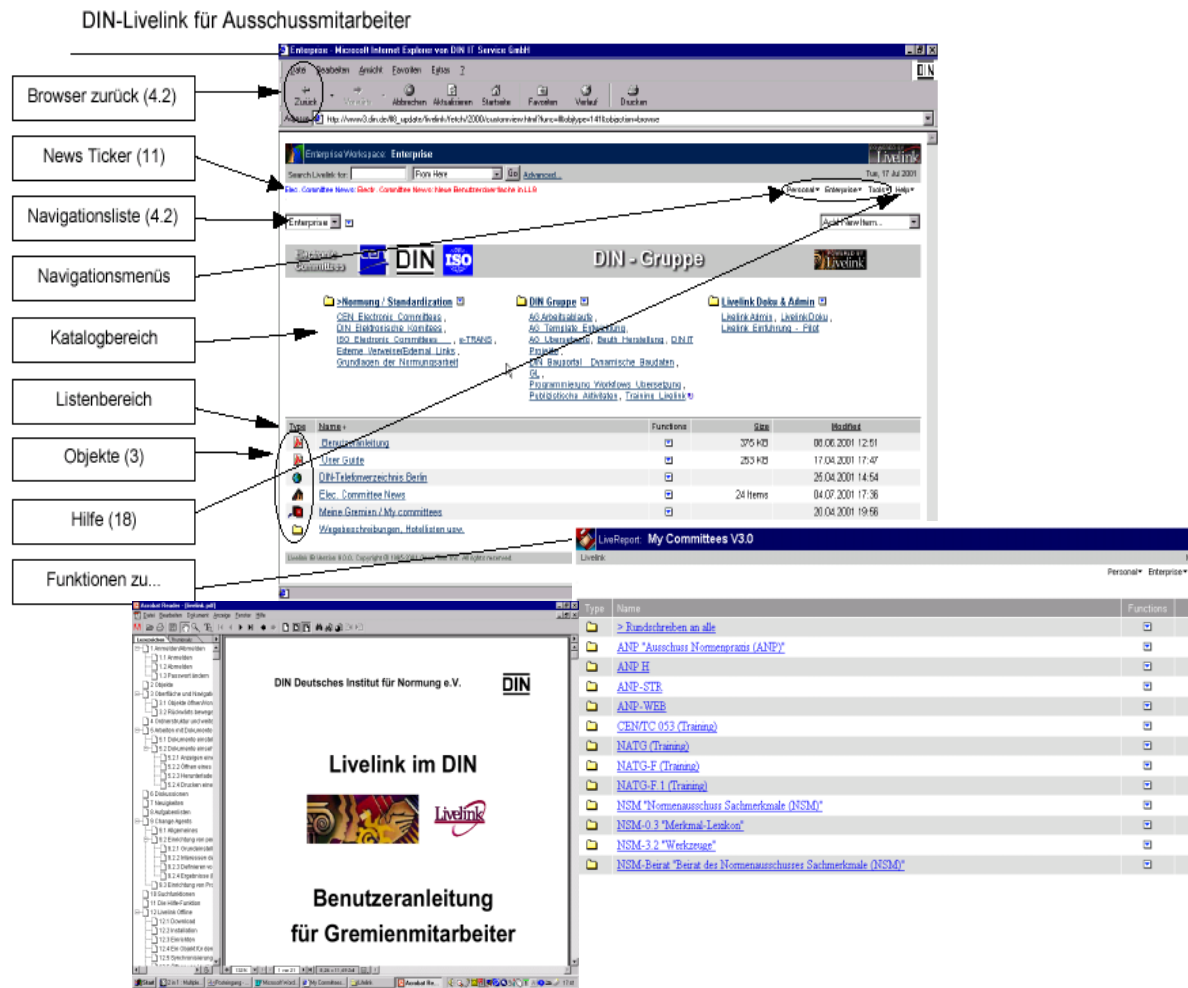


Bild 4: Livelink in DIN

## 7. Normungsorganisation in Unternehmen der Zukunft

Welche konkrete organisatorische Ausgestaltung das Normungsmanagement in Unternehmen zukünftig hat, wird letztlich von der spezifischen Unternehmenssituation abhängen. Gegenwärtig ist es jedoch dringend geboten, den Abbau des Normungs-Knowhows in Unternehmen zu stoppen und durch eine verstärkte Öffentlichkeitsarbeit das Bewußtsein für die Bedeutung der Normung in allen Gesellschaftsbereichen, insbesondere aber in den Unternehmen selbst, zu schaffen. Darüber hinaus wird sich das Qualifikationsprofil der Normungsmanager beträchtlich verändern müssen. Eine weitgehende Professionalisierung ist hier in Zukunft unabdingbar.

Aus heutiger Sicht zeichnen sich folgende Aufgabenschwerpunkte für ein zukünftiges Normungsmanagement in den Unternehmen ab:

- Ein virtuelles Normungsmanagement im Sinne der Dokumentation, Verwaltung insbesondere aber der elektronische Bereitstellung von technischen Regelwerken.
- Die Aufbereitung von Expertenwissen zur Normung im Unternehmen
- Das Normungsmanagement wird künftig die Aufgabe haben das Wissen zur Standardisierung im Unternehmen über die Informationsnetze des Unternehmens zu koordinieren und bereitzustellen.
- Die Nutzung moderner Informations- und Kommunikationsmittel, wie Internet oder Intra- bzw. Extranet wird Teil des Qualifikationsprofils der Mitarbeiter von Normungsabteilungen sein.
- Die Fähigkeit interne und externe Normungsstrategien für das Unternehmen zu

entwickeln, ist Teil des künftigen Qualifikationsprofils von Normungsmanagern.

- Die entwicklungsbegleitende Normung wird in Zukunft ein wertvolles Instrument zur Koordinierung nationaler, regionaler und internationaler Forschungs- und darstellen.
- Nutzung neuer normativer Dokumentenarten wie PAS, etc. für den strategischen und schnelleren Marktzugang.

**Tabelle 4** zeigt den entsprechenden Handlungsbedarf auf.

- Wissenschaftliche Untersuchung über die möglichen Organisationsformen unter Berücksichtigung von Informations- und Kommunikationstechniken
- Öffentlichkeitsarbeit zur Bedeutung der Normung in Unternehmen, Politik und Verbänden.
- Allgemeine gesellschaftsweite Öffentlichkeitsarbeit zur Bedeutung der Normung.
- Normung muß in die Stoffpläne von Schulen, Fachhochschulen und Universitäten.
- Mitarbeiterqualifizierung im Bereich Dokumentenmanagement und Bereitstellung, unter Berücksichtigung neuester Technologien.
- Mitarbeiterqualifizierung auf dem Gebiet Wissensmanagement.
- Mitarbeiterqualifizierung in den Bereichen Multimedia, Teamfähigkeit, Kommunikation, Verhandlungsführung.
- Mitarbeiterqualifizierung in den Bereichen Strategieplanung und Projektmanagement.
- Unternehmensweiten multimedialen Zugang zu normativen Dokumenten schaffen.
- Expertenwissen zur Standardisierung schrittweise aufbereiten und zur Verfügung stellen.
- Normung gezielt als Strategie für den Marktzugang einsetzen unter Nutzung aller gebotener Möglichkeit, wie der entwicklungsbegleitenden Normung (EBN) oder von Public Available Standards (PAS) etc.

**Tab. 4: Handlungsbedarf Normung (3)**

## 8. Ausblick und Wandel

Die Normung muß auch in Zukunft eingebunden sein in den schnellen Wandel von Industrie und Wirtschaft.

Besonders in der Informations- und Kommunikationstechnik liegt eine zukunftsweisende Möglichkeit für die Normung.

## Bei Eintreten einer zukunftsweisenden Entwicklung wird sich folgendes Bild ergeben:

- Strategische Managementmodelle zur Standardisierung haben sich durchgesetzt, sowohl nach innen als Strategie ins Unternehmen wie auch nach außen.
- Moderne Kommunikationstechniken und DV Anwendungen sind Standardwerkzeuge in Normungsinstituten für Manager und Normungsexperten.
- Der überwiegende Teil der Normungsexperten arbeitet online von allen Stellen in alle Stellen der Welt stattfinden.
- Hochschulen und Universitäten bieten multimedial aufbereitetes Wahlfach Normenwesen als Lehrmodul im Internet an.
- Normungskennnisse sind Bestandteile der Managementausbildung.
- Wissenschaft und Normung sind enger zusammengerückt und ergänzen sich.
- Normung und die Bildung von gezielten Standards haben in der Industrie und Wirtschaft einen höheren Stellenwert.
- Internationale Normung wird von Politik und Wirtschaft als strategisches Instrument erkannt, um nationale Wirtschaft international zu stärken.

Erste Ansätze sind getan, weitere müssen folgen!

Ein Sprichwort, das auch für Normung Gültigkeit hat!

**„Nur wer sich verändert, kann Zukunft gestalten.“**

## 9. Literatur

- /1/ ANP-Bericht  
Normung in Industrie und Wirtschaft im Jahre 2010, Standortbestimmung und Handlungsbedarf, Beuth-Verlag
- /2/ Gesamtwirtschaftlicher Nutzen der Normung  
Modul 3 des DIN-Projektes (Zusammenarbeit) Beuth-Verlag
- /3/ Strategische Bedeutung der Normung,  
Bericht DaimlerChrysler Forschung und Technologie 1999

## *demanda II*

### A prototype for Requirement Capture & Formalisation

Müller, D.

*Im Rahmen des Europäischen Forschungsprojekts KARE - Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering (Esprit 28916) - wurde ein Ansatz für wissensbasiertes Anforderungsmanagement unter Einbeziehung des sich in Entwicklung befindlichen Standards für repräsentierende Systemdaten ISO 10303 - STEP AP233 entwickelt.*

*Ein Teilaspekt dieses Ansatzes unterstützt die systematische Transformation von natürlich sprachlichen Anforderungen in eine modell-basierte Repräsentation der Anforderungen.*

*In the European research project KARE – Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering (Esprit 28916) - an approach to knowledge-supported requirement engineering and the relation to the emerging standard for representing system engineering data ISO 10303 - STEP AP233 has being developed.*

*A section of this approach features the systematic transformation from natural language requirements into a model-based representation of requirements.*

#### 1 Problem area

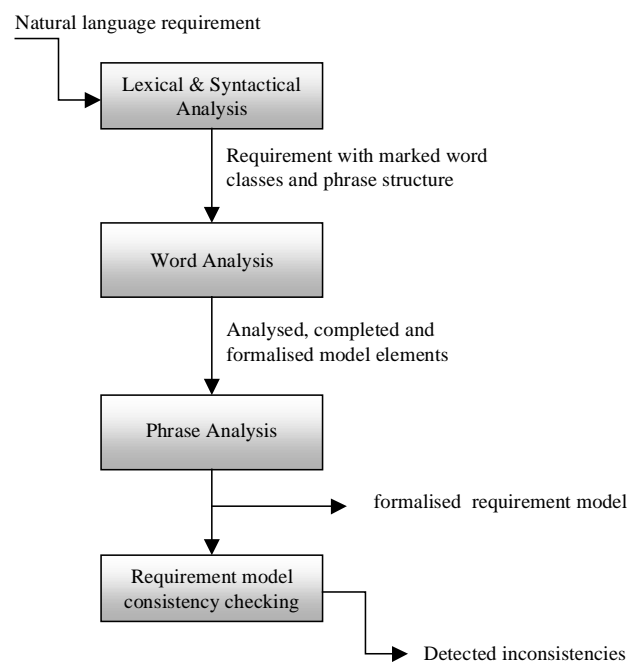
Natural language representation is the initial form of defining a requirement statement. Nowadays, the requirements for a product specification are mainly captured in text-documents of paper or electronic format. These documents establish the basis for the exchange of information between customer and supplier. They should include every kind of information linked with a product.

The extensive specification of requirements in natural language text is one of the main reasons for ambiguity and inconsistencies. The European research project KARE - Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering (Esprit 28916) intends to promote the current acquisition practices from a mainly document based approach to a system engineering model-based approach that allows the electronic interchange of all necessary data in a distributed engineering environment. The approach aims at producing consistent and complete product specifications in shorter times at substantially lower cost and with improved quality.

#### 2 Requirement Formalisation

The systematic transformation of natural language requirement statements into a model-based representation is named **requirement formalisation**. Within this formalisation process, every given requirement can be evaluated step by step with human interaction. This will be supported by the requirement formalisation tool *demanda II*, developed within the context of KARE by the TU Clausthal, Institute for Mechanical Engineering (IMW).

The information, included in each requirement statement that is specified in natural text, is transformed into a system model description that represents the same information. This will be realised by identifying elements of a system specification equivalent to ISO 10303 - STEP AP233. These are first of all the physical architecture, functions, functional behaviour and properties. The content of the resulting model is of course not more correct or complete in its quality than the natural language requirement. However, the model improves the possibility to check automatically on inconsistencies, missing or incorrect requirements.



**Figure 1:** Sequences of the requirement formalisation

The developed formalisation process of /3/ defines the implementation of how to transform natural language requirements into a model-based representation. Within this systematic process, one will obtain a model-based representation step by step out of individual fragments. At the end of the process, there will be a rigorous formalised model that represents the requirements. The requirement formalisation process as defined in /4/ consists of three main phases. **Figure 1** displays an overview of sequences of the requirement formalisation.

The **lexical and syntactical analysis** converts a sequence of characters into an ordered set of symbols and identifies different parts of speech. In the lexical analysis, the sentence is split into its single components (words) and these words are classified into different word classes. The syntactical analysis (or parsing) provides the hierarchical phrase structure of the sentence. As natural language permits ambiguity in respect to the phrase structure of a sentence, the user may have to resolve the ambiguity manually.

Based on the marked word classes and the phrase structure of a sentence, the **word analysis** follows as second step. It identifies the meaning of the different symbols in respect to the STEP AP233 data model. In other words, symbols describing a conceptual component of a system like i.e. function or property are analysed, completed and formalised. The contemplation of the meaning takes place on the level of words.

As last step, the **phrase analysis** captures the relationship between the identified symbols. Possible relationships are the hierarchy of components, interfaces between components and other relationships between components, functions and properties.

The entire realisation of the formalisation process maps the information contained in the defined requirements onto the data model. At the end, there exists a rigorous formalised requirement model. As mentioned before, the content of the resulting model is of course not more correct or complete in its quality than the natural language requirement. But this model can be checked systematically on rules of consistency or completeness. The integrated knowledge tool as part of the KARE *Workbench*, as described in /2/, will cover this process. But to gain rational support, often the basic knowledge of a domain expert is needed for particular instances.

### 3 The Systems Engineering standard ISO 10303-AP233

The ISO 10303 - STEP AP233 specifies an application protocol (AP) for the systems engineering design data. The AP233 defines the context, scope and information requirements for various development stages during the design of a system. This application protocol shall be applicable to any form of systems, such as aircraft, cars, marine and plant.

These systems are made up of a set of predominantly active components, sensors, displays and actuators that are interconnected via dedicated direct links or by communication means. Systems cannot be simply considered as a sum of the single components; rather, their integrated behaviour and properties which in most cases are real-time dependent, has to be defined, validated and verified.

The systems engineering process models use techniques such as functional decomposition and abstraction as the means of tackling the complexity of the systems being developed.

The following domains are covered by the 5th Working Draft of the AP233 (see also /1/):

Requirements:

- Elicitation and analysis
- Tests definition

Functional Design:

- Data description support
- Function description support
- Behaviour description support
- OO Design

Physical Design:

- Topological architecture definition
- Function component mapping support

Graphical representation and layout

Traceability & Configuration management

Industry process:

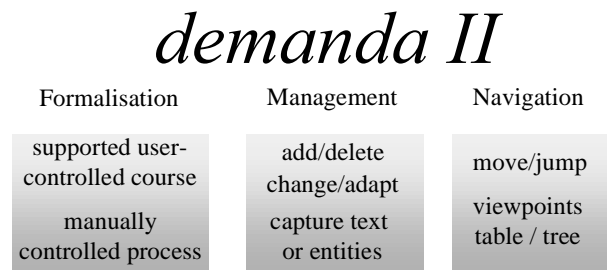
- Risk management
- Justification management
- Documentation support
- Link with workflow definition
- Approval support
- Person allocation
- Date allocation
- Effectiveness management

It is very likely that all these domains will be included in the final AP233. A Publicly Available Specification for the Systems Engineering Data Representation will be available soon (PAS 20542).

#### 4 An overview of the Requirement Capture and Formalisation Tool *demanda II*

The KARE *Workbench* is the prototype demonstrator for the profit of integration of a model-based approach into the early development phase of a complex product within a distributed environment.

Beside a Requirement Management Tool and a Knowledge Management Tool, one integrated part of the KARE *Workbench* is the Requirement Capture and Formalisation Tool *demanda II*. This prototype is a completely new development by the IMW. It supports the user to capture, formalise and manage natural language requirements on the level of a data model with lots of supplied functionality. **Figure 2** specifies a general overview of the supported functionality.



**Figure 2:** Supported functionality of *demanda II*

**Formalisation** – One main task of *demanda II* is the user-support to formalise natural language requirements. There are two possible courses to perform the transformation of specified system requirements into a model-based representation.

One opportunity is to be led systematically through the formalisation process. A user-controlled course guides step by step to a model-based representation of the corresponding requirement. This process is not fully automated, because of the complexity of speech. So the user still has the possibility to influence the input to the information repository.

A sophisticated user will have the possibility to abstain from the given procedure to realise a formalisation manually. The general offered functionality of *demanda II* to manage and create entities enables the user to realise a complete or partial mapping of the formalisation based on his own knowledge and interpretation.

**Management** – *demanda II* volunteers the user with many management facilities. The file exchange is currently based on STEP AP233 Part21 files (Step physical files). The exchange interface of *demanda II* covers the complete scope of AP233.

Processed files of a Requirement Management Tool establish the basis for *demanda II*. For more or less unformalised files, the complete scope of management facilities are applicable to realise and define a formalisation. For files that have already passed a formalisation procedure, the normal functional range is at a user's disposal to handle, adapt or change these represented requirements. In general, the user can create, delete instances or he can change, add or adapt the content of single attributes of an existing data model instance.

Altogether the tool offers a complete functionality to handle the content of the data model. And because the concept of *demanda II* is based on the level of the data model, the basic functionality hands a wide scope of freedom to act on and with the data model, not restricted by incomplete interfaces.

**Navigation** – For a better overview and control of the content of the data repository, *demanda II* offers the possibility to obtain information and navigate directly on the level of the data model.

This means explicitly, different view facilities enable the user to get information of the actual content of the data model repository, alternatively on the level of entities or instances. At the beginning this seems to be a little bit complicated, but with some experiences with the data model the user will appreciate this functionality. This offers the opportunity to get complete control over the content of the model and the represented information. This saves time to receive a correct and consistent model representation.

#### 5 The GUI of *demanda II*

The architecture of *demanda II* consists of three assembled components. The prototype is based upon a runtime module, generated by the ECCO Toolkit - Version 2.3.0 from PDTec GmbH, Germany. For the compilation of the runtime module, the EXPRESS source code of ISO 10303 - STEP AP233 WD5.2 has been used as underlying data model repository. The GUI of *demanda II* puts on these two components. It has been implemented within the tool command language Tcl/Tk (Version TclPro 1.4.1 - bundles Tcl/Tk 8.3.2 and compatible versions of TclX and [incr Tcl]) by the IMW. **Figure 3** offers an overview of the GUI.

The main window of the GUI is structured into three parts. Below the menu bar and the used schema information on top of the window, the user will find the text capture and operating window. This is the

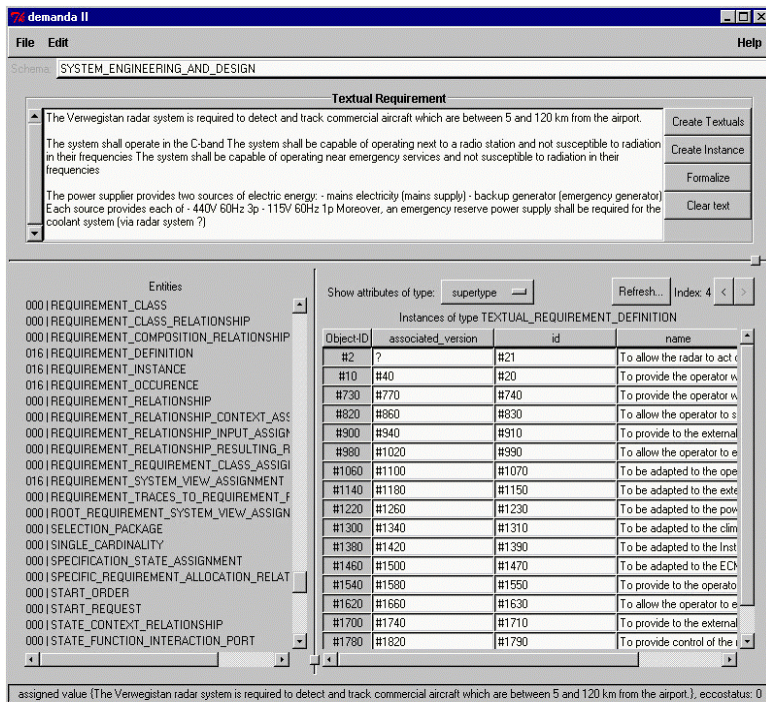


Figure 3: Overview of the GUI of *demanda II*

main window for capturing new textual requirements and to start with different parts of formalisation. The text capture window owns the basic functionality of a text editor. This entered text represents the starting point for a formalisation. The row of buttons on the right side will initiate different operations of formalisation. There exists the opportunity to create a new textual requirement, a new instance of any desired data model entity or start a supported requirement formalisation.

The lower part of the main window serves the management and navigation facilities. On the left side of the window the complete list of AP233 entities is displayed in alphabetical order. To get extended information about the instances, selection with the mouse will display the content of all related instances of an entity on the right side. The content will be displayed in a table in linear order of the object-id's. Left mouse click on an attribute will display an interactive window with the content of the chosen instance. The values can be changed, added or deleted.

## 6 Conclusions

*demanda II* is a complete new development and therefore a first but working prototype. It is already a powerful tool that offers some new functionality to act on a systems engineering data representation. The architecture offers a great variability in terms of adaptation and updating. With the exchange of new modules, it will be possible to keep it up-to-date with less effort. Because of the complexity of

speech and limited time of development, the automation of the requirement formalisation is not sophisticated. But considering that the technical basis is already existing, with the big advantage of an complete supported interface, the tool represents the basis for further developments. These developments will look into a predominant automated requirement formalisation, an enhanced GUI with additional functionality for a more user-friendly environment for not so sophisticated users and an extension of the interface for XML support to enable web based technologies.

The KARE project - Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering - is co-funded by the European Commission under the ESPRIT programme, No. 28916. The author wishes to acknowledge the Commission for their

support. He furthermore wishes to acknowledge the KARE project partners for their contribution during the development of various ideas and concepts. For further information please check out the KARE web-pages <http://www.kare.org/>.

## 7 Summary

*demanda II* is a prototype for requirement capture and formalisation. The requirement formalisation features the systematic transformation of natural language requirements into a model-based representation. As referenced data model is used the ISO 10303 – STEP AP233 for systems engineering data representation. Embedded into the KARE Workbench architecture and concept, *demanda II* supports the process of knowledge supported requirements engineering on supplier and acquirer side.

## 8 Literature

- /1/ N.N.: <http://www.sedres.com/>, 2001
- /2/ K. Heimannsfeld, D. Müller: Requirements Engineering Knowledge Management based on STEP AP233, Institutsmitteilung Nr. 25, Institut für Maschinenwesen, TUC 2001
- /3/ Heimannsfeld, K.: Modellbasierte Anforderungen in der Produkt- und Systementwicklung; Shaker Verlag, Aachen 2001
- /4/ D. Müller, K. Heimannsfeld: The KARE Formalisation Process Specification and Model Usage Guide, KARE Internal paper, 2001



# Der Einfluss des Rillungssystems auf die Bordscheibenbelastung

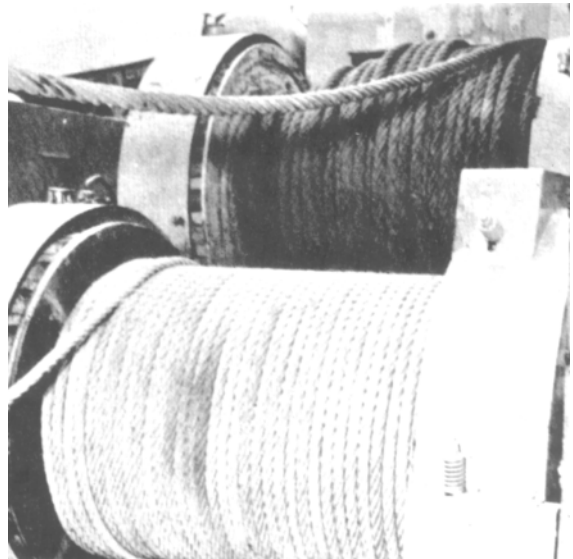
Mupende, I.; Otto, St.

*Der Einfluss des Rillungssystems auf die Beanspruchungen der Bordscheiben und des Mantels einer Seiltrommel war in der Vergangenheit kaum Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte zur Konstruktion und Dimensionierung von Leichtbau-Seiltrieben wurden am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal theoretische und experimentelle Arbeiten zu diesem Thema durchgeführt. Für die experimentellen Versuche kam ein deutschlandweit einzigartiger Windenprüfstand zum Einsatz, über den im folgenden u.a. berichtet wird.*

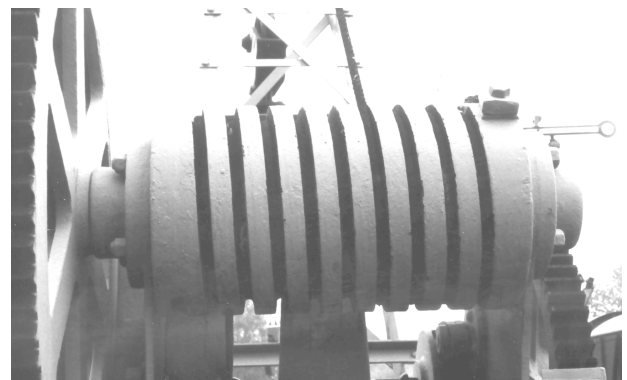
*So far, the influence of the hoisting drum winding system on the loads of the drum cylinder and end plates was not investigated in detail. Within several research projects in the field of design and calculation of hoisting drums, the Institute of Mechanical Engineering has undertaken theoretical and numerical investigations regarding the above mentioned problem. The experimental tests were done with an unique drum-winch test rig that is described amongst other things in this article.*

## 1 Einleitung

Die ursprünglich in der Förder- und Hebetechnik eingesetzten Seiltrommeln besaßen einen glatten Trommelmantel. Damit war die Restriktion verbunden (nach §21 der Unfallverhütungsvorschrift [1]), dass das Seil in erster Linie nur einlagig aufgewickelt werden durfte, weil die Seilführung schlecht und die Gefahr des Einschneidens höherer Lagen sowie des Aufbaus des Seils an einer Stelle groß war (**Bild 1**). Eine mehrlagig bewickelte glatte Trommel wurde deshalb ausschließlich in Verbindung mit geringen Ansprüchen an die Zugkraft (z.B. Speichertrommel hinter einem Treibscheibenantrieb) eingesetzt. Später versah man den Mantel häufig mit schraubenförmig eingedrehten Rillen (**Bild 2**), womit die Seilführung in der ersten Lage – und nur in dieser – verbessert werden konnte. Eine Mehrlagenbewicklung unter hohen Zugkräften war aber auch mit diesem Wickelsystem nicht realisierbar. Zudem führte der lange Kreuzungsbereich der einzelnen Windungen zu einem ausgedehnten Seilverschleiß und damit zu einer geringen Lebensdauer des Seils.



**Bild 1:** Vergleich der Wickelbilder; glatte Seiltrommel mit aufgebautem Seil (oben im Bild) und geordnetes Seilpaket bei einer Trommel mit Rillungssystem nach LeBus (unten im Bild), [2]

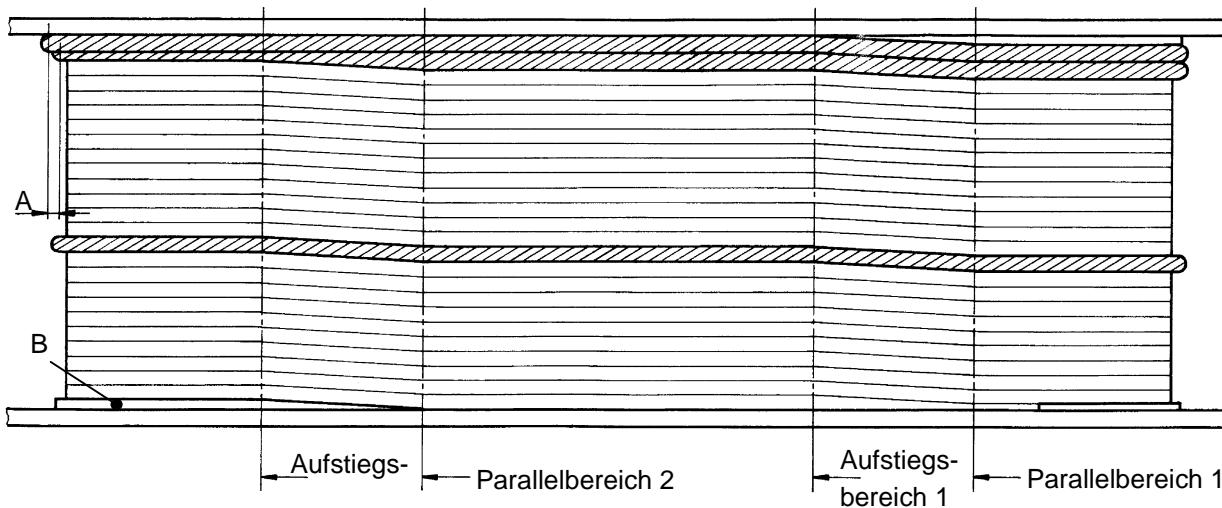


**Bild 2:** Beispiel für eine einlagige Seiltrommel mit schraubenförmiger Rillung (Mobilkran der 20er Jahre)

## 2 Rillungssystem nach LeBus

Anfang der 60er Jahre stellte die Firma LeBus International Engineers ein neues Rillungssystem vor, das heute im Bereich der Hub- und Bergewinden eine breite Anwendung findet. Dieses, im allgemeinen als Lebusberillung bezeichnete, Rillungssystem ist durch vier Umfangsbereiche – zwei Parallelabschnitte und zwei Steigungsabschnitte, in denen das Seil jeweils um den halben Windungs-





**Bild 3:** Abgewickelte Seiltrommel mit Lebusberillung; A) Aufstieg in die nächste Lage; B) Ausgleichs- und Steigungselement

abstand abgelenkt wird – charakterisiert (**Bild 3**). Die Winkelausdehnung der Parallel- und Aufstiegsbereiche variiert von Konstruktion zu Konstruktion und ist vom Einsatzfall, dem Seildurchmesser, den Trommelabmessungen und der Seilbiegesteifigkeit abhängig. Üblicherweise sind die Parallelbereiche größer als die Aufstiegsbereiche, sie nehmen ca. 50 bis 80% der Manteloberfläche ein. Um die Seilführung im Bereich des Seileinlaufs und beim Aufstieg zur nächsten Lage zu unterstützen, werden in der ersten Lage häufig Ausgleichs- und Steigungselemente angebracht (vgl. **Bild 3**).

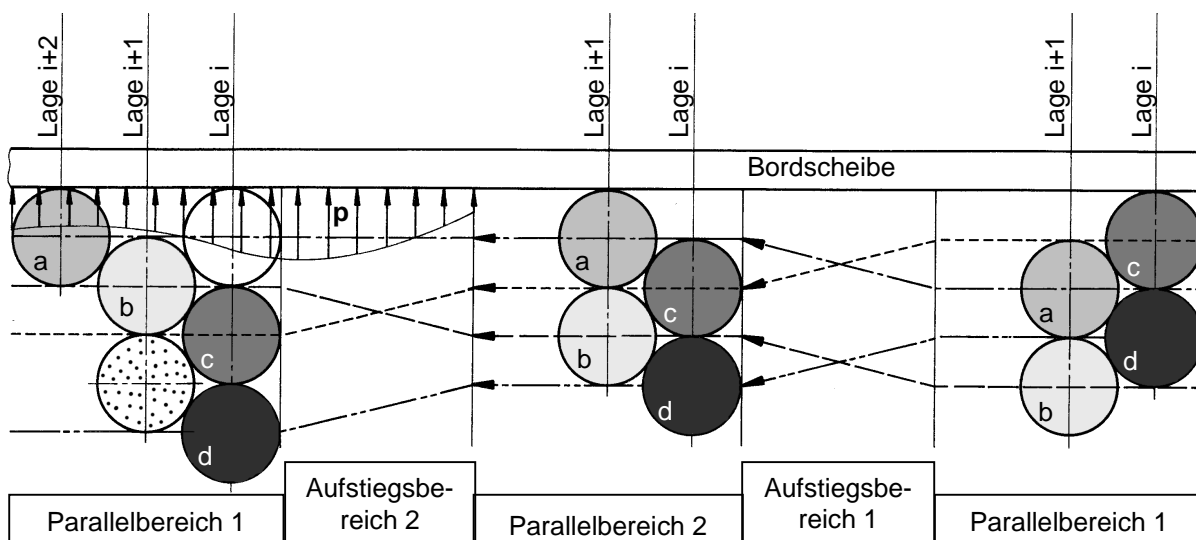
Mit der Lebusberillung erfährt das Seil auch in den oberen Lagen eine definierte Führung, weil die Windungen der unteren Lage praktisch die Funktion der Mantelrillung übernehmen. Resultierend hieraus bildet sich ein geordnetes Seilpaket, das eine hohe Lagenanzahl und damit kompakte Seiltrommelkonstruktionen erlaubt. Die relativ kleine Win-

kelausdehnung der Aufstiegsabschnitte bewirkt eine Verkürzung des Kreuzungsbereichs der Windungen zweier benachbarter Lagen, wodurch der Seilverschleiß und das Abplatten des Seilquerschnitts örtlich begrenzt wird. Ein weiterer Aspekt, der im folgenden näher betrachtet werden soll, sind die gegenüber den glatten bzw. schraubenförmig verrillten Seiltrommeln veränderten Kontaktverhältnisse zwischen Seil und Bordscheibe.

### 3 Spulungsvorgang

Bei einer Seiltrommel mit Lebusberillung werden prinzipiell zwei Steigungsprozesse unterschieden:

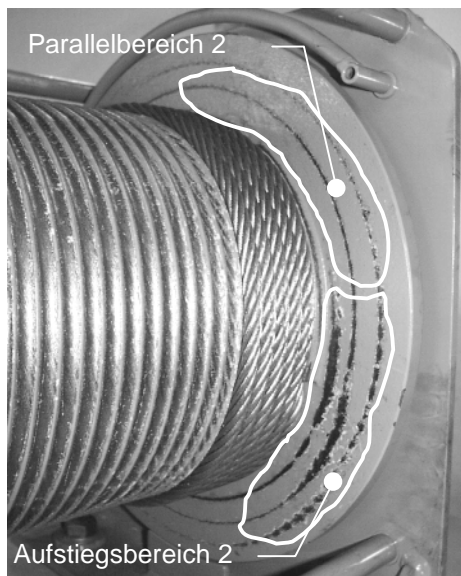
- das Steigen (Weiterschieben) der Windungen in Axialrichtung und
- das Aufsteigen der letzten Windung in die nächste Lage.



**Bild 4:** Darstellung des Spulungsvorgangs

Das Aufsteigen zur nächsten Lage vollzieht sich in mehreren Phasen. Die dabei herausgebildeten Kontaktverhältnisse sind maßgebend für die Belastung der Bordscheibe und damit auch für deren Dimensionierung. Das Aufsteigen des Seils kann wie folgt beschrieben werden (**Bild 4**):

1. Erreicht die letzte Windung  $a$  der Lage  $i+1$  den Parallelbereich 2, so läuft es zunächst noch entlang der Bordscheibe, ohne eine Kraft auf diese auszuüben.
2. Im anschließenden Aufstiegsbereich 2 verhindert die Bordscheibe das axiale Weiterschieben des Seils, so dass dieses auf der darunter liegenden Windung (oder auf dem Aufstiegskeil) in die nächste Lage  $i+2$  aufsteigt. In dieser Phase entwickelt sich ein Druck auf die Bordscheibe, dessen Wirkungslinie mit einer Spiralfunktion [3] beschrieben werden kann.
3. Im folgenden Parallelbereich 1 legt sich das Seil in die Lücke zwischen der letzten Windung der unteren Lage  $i+1$  und der Bordscheibe. Durch diesen Keileffekt wird weiterhin Druck auf die Bordscheibe ausgeübt, die Wirkungslinie entspricht jetzt einem Kreisbogenabschnitt.
4. Im nächsten Aufstiegsbereich 1 verliert das Seil den Kontakt zur Bordscheibe, da es sich um eine Vollsteigung in Axialrichtung zur gegenüberliegenden Bordscheibe zurückbewegt.



**Bild 5:** Kontaktspuren an einer Bordscheibe einschließlich einer groben Abgrenzung der maßgebenden Druckbereiche

Zusammenfassend betrachtet erstreckt sich der Kontaktbereich zwischen Bordscheibe und Seil über maximal  $180^\circ$  (ein Aufstiegsbereich und ein

Parallelbereich, **Bild 5**). Die Kontaktzonen zweier benachbarter Lagen liegen dabei für den Fall einer Seiltrommel mit ganzzahliger Windungsanzahl um  $180^\circ$  versetzt zueinander.

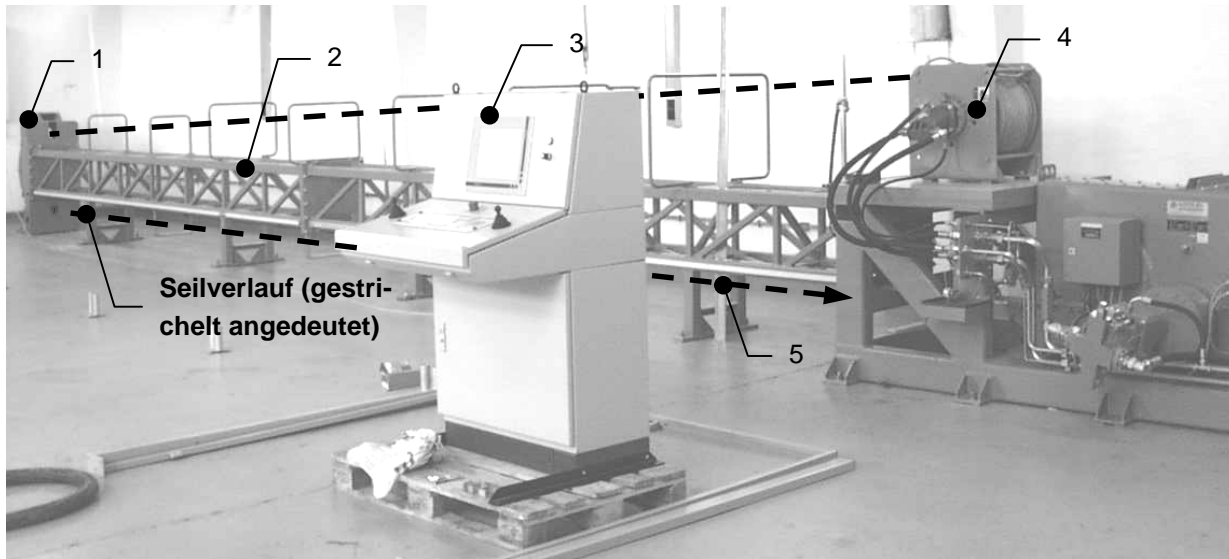
Die begrenzten Kontaktzonen führen zu einer asymmetrischen Belastung der Bordscheiben, die am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal mit Hilfe von Finite Elemente Simulationen und experimentellen Beanspruchungsanalysen untersucht wurde.

#### 4 Windenprüfstand

**Bild 6** zeigt eine Gesamtansicht des Prüfstandes, der eine Länge von 16 m misst. Als zentrale Baueinheit ist die Treibscheibenwinde HS 200 der Firma Rotzler zu nennen, mit der Zugkräfte bis zu 300 kN und Seilgeschwindigkeiten bis zu 40 m/min realisiert werden können. Weiterhin bietet diese Treibscheibenwinde die Möglichkeit, Seile mit Durchmessern zwischen 12 mm und 29 mm einzusetzen, womit sich ein umfangreiches Spektrum an Prüfaufgaben ergibt. Das nahezu lastfrei aus der Treibscheibenwinde auslaufende Seil wird auf eine Speichertrommel gewickelt, die in Abhängigkeit des verwendeten Seildurchmessers Seillängen zwischen ca. 400 m und ca. 600 m aufnimmt. Diese hohe Speicherkapazität gewährleistet die Durchführung von Versuchsreihen, bei denen die Prüfwinde in weiten Grenzen mehrlagig bewickelt werden kann.

Als maximale Abmessungen für den Prüfling sind ein bewickelter Durchmesser bis maximal 800 mm und eine Trommellänge bis zu 1000 mm (entspricht einem maximalen Ablenkungswinkel von  $1,8^\circ$  im unbelasteten Zustand) zulässig. Die Untersuchung größerer Prüflinge oder glatter Trommeln mit Seilwickelvorrichtung ist, entsprechende Umbauarbeiten vorausgesetzt, im Einzelfall ebenfalls möglich.

Die Versuchsdurchführung erfolgt im automatischen Prüfbetrieb. Hierbei ist es möglich, die Seilzugkraft und -geschwindigkeit lagenweise zu variieren, so dass die Beanspruchungsverteilung einer mehrlagig bewickelten Trommel unter verschiedenen Lastsituationen (z.B. konstante Zuglast in allen Lagen oder Bewicklung mit niedrigen Seilzugkräften in den unteren und mit hohen in den oberen Lagen) analysiert werden kann. Durch die Vorgabe von Lastkollektiven kann ebenfalls das dynamische Betriebsverhalten von Seiltrommeln und der Einfluss des Seilverschleißes auf das Spulungsverhalten untersucht werden.



**Bild 6:** Universal-Seiltrommelprüfstand zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme; 1) Umlenkscheibe, die sich über einen Hebel auf einer Kraftmeßdose zur Erfassung der Seilzugkraft abstützt; 2) Gittermast mit Seilfängen; 3) Steuerpult für den manuellen und automatischen Prüfstandsbetrieb; 4) Prüfwinde; 5) zur Bremswinde und Speichertrommel

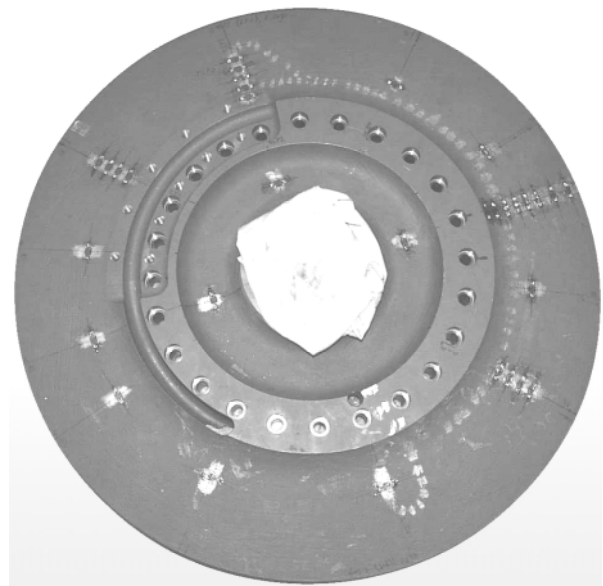
## 5 Messung und Simulation der Bordscheibenbelastung

Die Erfassung der Bordscheibenbeanspruchungen erfolgte mit Hilfe einer telemetrisch arbeitenden DMS-Vielstellen-Messtechnik. In **Bild 7** ist die Verteilung der Messpositionen über dem Umfang und dem Radius einer Bordscheibe dargestellt. Die eingesetzten DMS-Gitter erlauben es, die Dehnungen in Radial- und Tangentialrichtung zu messen, womit der Spannungs- und Verformungszustand der Bordscheiben genau beurteilt werden kann.

Für einen Versuch mit konstanter Zugkraft von der ersten bis zur letzten Lage ergab sich über dem Umfang der Bordscheibe die in **Bild 8** gezeigte Spannungsverteilung (Radial-, Tangential- und Vergleichsspannung). An der betrachteten Bordscheibe steigt das Seil im 2. Aufstiegsbereich nach oben, so dass in diesem Winkelsektor hohe Beanspruchungen auftreten (vgl. **Bild 8**). Entsprechend den vorangegangenen Ausführungen bleibt das Seil auch im folgenden Parallelbereich 1 im Kontakt mit der Bordscheibe, weshalb die Druckbelastung (mit abnehmender Tendenz) erhalten bleibt. Der Spannungsverlauf bestätigt damit die anhand des Spulungsvorgangs erläuterte asymmetrische Belastung der Bordscheibe bei einer Seiltrommel mit Lebusberillung.

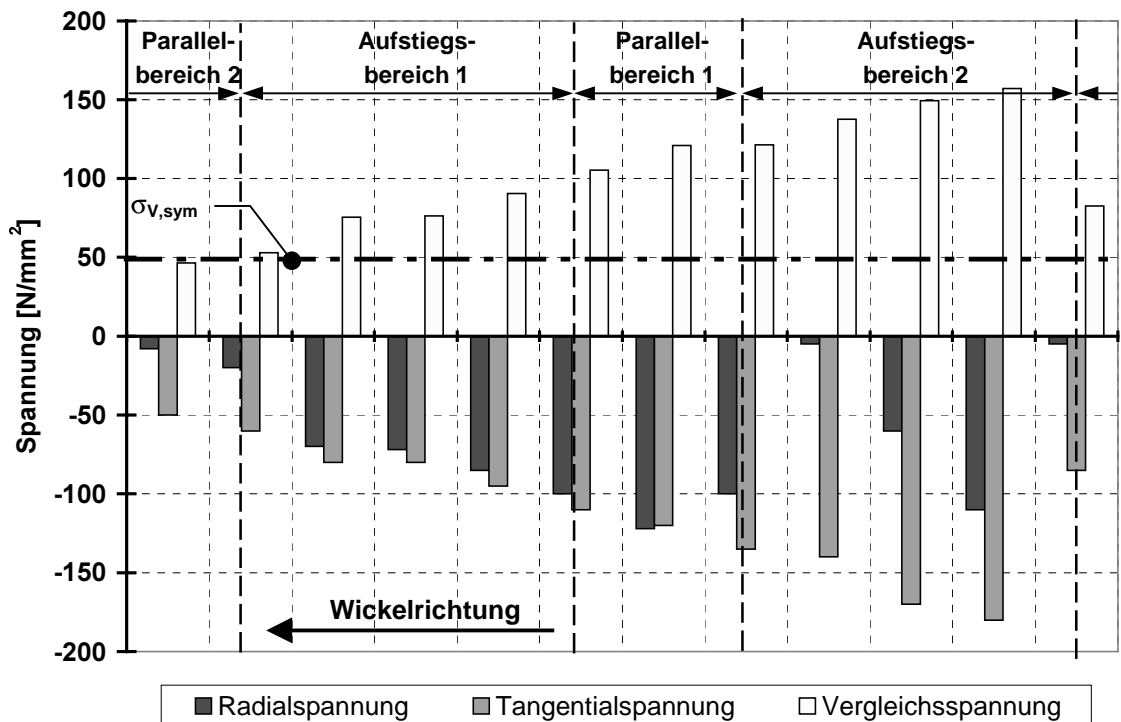
Bisher verwendete Berechnungsmethoden [4, 5, 6] gehen davon aus, dass die aus der Verformung des Seilpakets resultierende Axialkraft auf die Bord-

scheiben als Linienlast über den gesamten Umfang wirkt. Damit wird gleichzeitig eine symmetrische Belastung der Bordscheiben vorausgesetzt. Diese Betrachtungen stimmen mit den Belastungsverhältnissen von glatten und schraubenförmig verrillten Seiltrommeln, bei denen das Seil die Bordscheibe nahezu über den gesamten Umfang berührt, gut überein.



**Bild 7:** Verteilung der DMS-Messstellen über dem Umfang und dem Radius der Bordscheibe

Wie die experimentellen Untersuchungen gezeigt haben, entwickelt sich der Druck auf die Bordscheiben bei einer Seiltrommel mit Lebusberillung jedoch

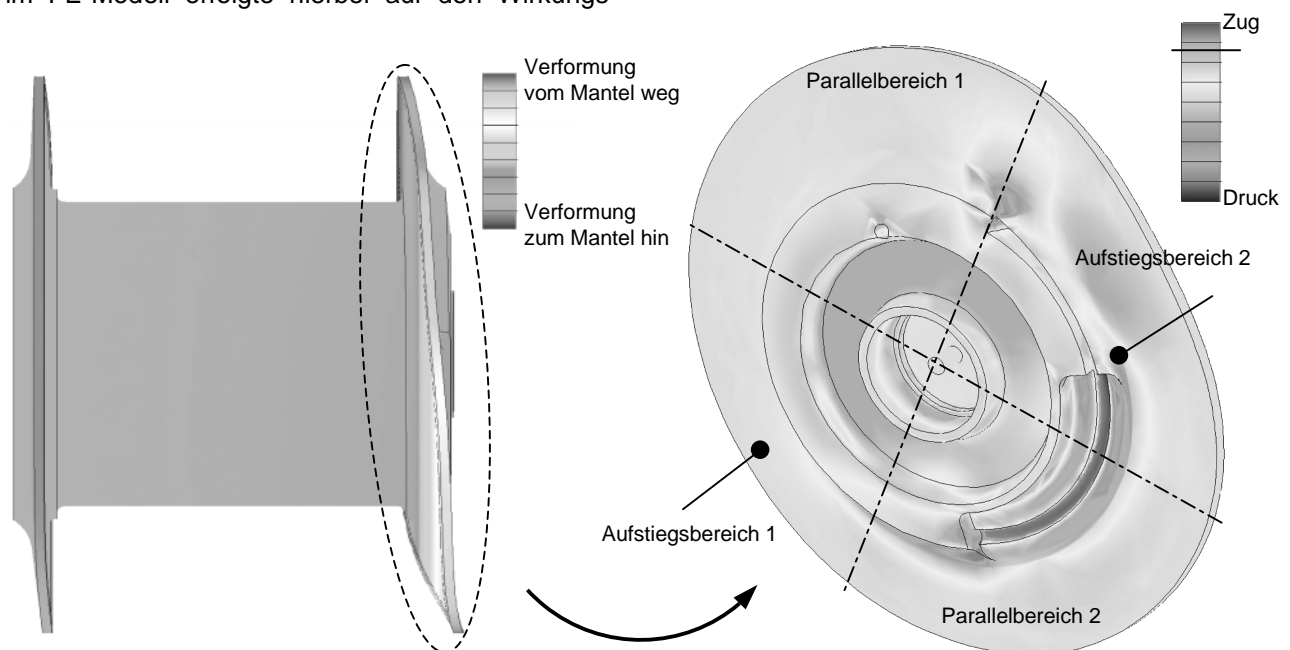


**Bild 8:** Spannungsverteilung über dem Umfang der Bordscheibe gemessen auf der 5. Lage ( $\sigma_{V,sym}$  ist die erwartete Vergleichsspannung bei einer symmetrisch belasteten Bordscheibe)

nur in einem Winkelbereich von maximal 180°. Die erzeugten Beanspruchungen können deshalb lokal um das Dreifache höher sein als bisher in der Auslegung angenommen wird.

Die asymmetrische Verformung der Bordscheibe wurde auch mit Hilfe von Finite Elemente Simulationen nachgewiesen. Die Einleitung der Axialkräfte im FE-Modell erfolgte hierbei auf den Wirkungs-

linien der Kontaktzonen zwischen Seil und Bordscheibe, also auf einem Bogensegment (Spiralbogensegment im Aufstiegsbereich bzw. Kreisbogensegment im Parallelbereich). **Bild 9** zeigt das asymmetrische Verformungsbild einer derartig belasteten Bordscheibe, welches durch das lokale „Herausklappen“ des hochbelasteten Aufstiegsbe-



**Bild 9:** Asymmetrische Verformung und Beanspruchung der Bordscheibe einer Seiltrommel mit Lebusberührung; FE-Simulation (Seilzugkraft  $F_S = 100$  kN, Mantelgrunddurchmesser  $d_G = 467$  mm, Bordscheibendurchmesser  $d_B = 855$  mm)

reichs (vgl. **Bild 8**) gekennzeichnet ist. Markant für diese Art der örtlich begrenzten Biegeverformung sind hohe tangentielle Zugspannungen an der Außenseite der Bordscheibe.

## 6 Fazit

Konventionelle, aber heute noch angewendete Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Bordscheibenbeanspruchungen basieren auf der Annahme einer symmetrischen, über den Umfang der Bordscheibe gleichmäßig verteilten Axiallast, welche aus dem Linienkontakt der Seilpaketlagen resultiert.

Diese Vorgehensweise erfasst die Bordscheibenbeanspruchungen einer Seiltrommel mit Lebusberillung nur ungenügend. Begründet durch den Spulungsvorgang entsteht bei diesem Rillungssystem eine asymmetrische Druckverteilung über dem Kontaktbereich der einzelnen Lagen, der sich auf maximal  $180^\circ$  (ein Aufstiegs- und ein Parallelbereich) begrenzt. Bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln mit einem geometrischen Verhältnis von ca.  $h_B/d_B < 0,025$  und ca.  $d_B/d_G > 1,8$  (Bordscheibendicke  $h_B$ , Bordscheibendurchmesser  $d_B$ , Mantelgrunddurchmesser  $d_G$ ) ergibt sich ein Verformungs- und Beanspruchungsverhalten, das sich von dem einer symmetrisch belasteten Bordscheibe deutlich unterscheidet.

Diesem Sachverhalt sollte der Konstrukteur besonders bei der Entwicklung von mehrlagigen Leichtbau-Seiltrommeln Beachtung schenken, um durch realitätsnahe Lastannahmen eine sichere Konstruktion zu erzielen.

## 7 Literaturhinweise

- [1] Ernst, H.: Die Hebezeuge – Grundlagen und Bauteile. Friedr. Vieweg & Sohn, Verlag, 1950
- [2] LeBus – system of controlled multilayer wire rope „spoolin“. Prospekt der Firma Le Bus International Engineers GmbH, München, 1969
- [3] Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel – Bordscheiben bei mehrlagig bewickelter Seiltrommel unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten. Dissertation, TU Clausthal, 2001
- [4] Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation, TH Darmstadt, 1971

- [5] Kraitschy, H.: Beanspruchung der Bordscheiben von Seiltrommeln. Dissertation, Rostock, 1973
- [6] Waters, E.O.: Rational Design of Hoisting Drums, The American Society of Mechanical Engineers. Transactions, 42 (1920)
- [7] Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln. Dissertation, TU Clausthal, 1999

## 3D Graphik in der Messdatenerfassung

Käferstein, B.

Zur Messung der Schallabstrahlung von Maschinen und Geräten kann das sog. Oberflächenhüllverfahren nach DIN EN ISO 3746 angewendet werden. Dabei wird der abgestrahlte Schallpegel an verschiedenen Punkten auf z.B. einer die Maschine einhüllenden Halbkugel gemessen. Im Zuge der Konstruktion eines Drehgalgens zur Steuerung des Fahrweges war es notwendig, einen kleinen Ausflug in die Computergraphik zu unternehmen: Die Position des Messroboters sollte graphisch dargestellt werden, da während der Messung kein Zutritt zum schallisolierten Messraum möglich ist.

The surface envelope method according to DIN EN ISO 3746 is used to calculate the radiated sound. Sound pressure level measurements are taken at different points on a surface. A half sphere may be used to surround the machine. During the design process of the position control unit for the rotating boom it was necessary to undertake a little excursion to computergraphics. The Software should display the position of the measuring robot because due to restricted entrance of the test chamber.

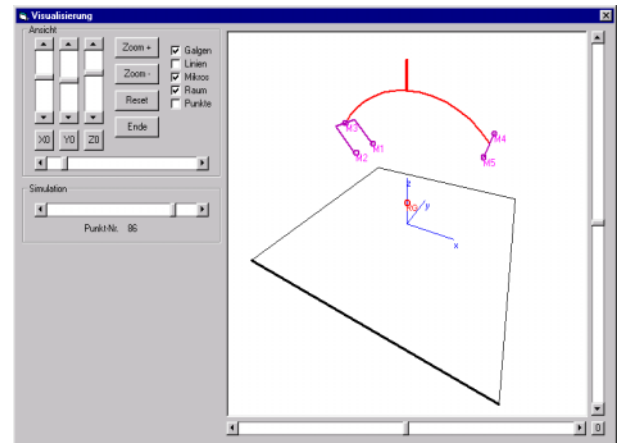
### 1 Motivation

Ein 180°-Bogen aus Hohlprofil stellt die Trägerkonstruktion für die Meßmikrophone dar. Das Profil ist an der Decke des Meßraums drehbar befestigt und der Bogen kann der Länge nach mit einem dort angebrachten E-Motor durch eine Führung gezogen werden. Es ergeben sich daher zwei Freiheitsgrade (Azimuth und Elevation). Die fest am Träger angeschraubten Messmikrophone werden daher über dem Objekt auf einer Halbkugel positioniert, die damit auch die Hüllflächenform festlegt. Durch Messen des Schalldruck- oder Intensitätspegels an festgelegten Punkten kann unter Berücksichtigung der zugehörigen Hüllflächensegmentengröße der Schallleistungspegel errechnet werden.

Da sich während des Meßvorgangs aus Sicherheitsgründen niemand im Raum aufhalten darf aber dennoch die Stellung des Roboters angezeigt und simuliert werden soll, **Bild 1**, wird sie graphisch am Rechner dargestellt. Für die Steuerung wurde ein eigenes Programm unter MS Visual Basic entworfen, das die Positionsdaten aus einer Excel-Geometrieberechnungstabelle ausliest, **Bild 2**. Damit werden die Servomotoren des Roboters an-

gesteuert. Bei Erreichen der Position wird die Messwerterfassung gestartet und der zugehörige Schalldruckverlauf aufgezeichnet.

Bei Einsatz einer Intensitätssonde ist es weiterhin möglich, die abgestrahlte Schallleistungsdichte ver-



**Bild 1:** Drehgalgengeometrie im Ansichtsfenster

teilung sichtbar zu machen, mit der die Orte der stärksten Luftschallabstrahlung auf der Maschine identifiziert werden können. Dann können gezielt weitere Maßnahmen zur Schallminderung durchgeführt werden.

### 2 Grundlagen der 3D-Visualisierung

#### 2.1 Rotation und Translation

Grundlage der Darstellung bilden 4x4 Matrizen und Vektoren des  $\mathbb{R}^4$ , die eine schnelle, einfache und standardisierte Behandlung der Graphikroutinen ermöglichen. Es wird eine Transformationsmatrix  $M$  aufgestellt, die folgendes Aussehen hat:

$$M = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 1}$$

Die linke obere Teilmatrix der Größe 3x3 wird mit Drehwinkelargumenten besetzt, so daß man z.B. für eine Drehung um die x-Achse und um die y-

Nr.	s [m]	φ [rad]	φ [°]	ψ [°]	ψ [rad]	Salgen X	Salgen Y	Salgen Z	Ok?	Mikro aktiv	Mikro aktiv X	Mikro aktiv Y	Mikro T aktiv Z	Mikro T aktiv X	Mikro T aktiv Y	Mikro T aktiv Z
1	0.001	0.0000	0.0	0.0	0.0000	0.001	0.000	2.200	ok	1	0.001	-0.250	1.700	0.001	-0.250	1.700
2	0.267	0.6263	36.0	9.0	0.1571	0.215	0.156	2.179	ok	2	0.005	0.313	1.695	0.299	-0.092	1.695
3	0.267	1.2566	72.0	9.0	0.1571	0.082	0.253	2.179	ok	3	0.082	0.253	2.179	0.296	0.101	1.695
4	0.267	1.8869	108.0	9.0	0.1571	-0.082	0.253	2.179	ok	4	0.190	0.256	1.695	0.190	0.256	1.695
5	0.267	2.5133	144.0	9.0	0.1571	-0.215	0.156	2.179	ok	5	-0.215	0.156	2.179	-0.005	0.313	1.695
6	0.267	3.1416	180.0	9.0	0.1571	-0.266	0.000	2.179	ok	6	-0.266	0.000	2.179	-0.188	0.250	1.695
7	0.267	3.7699	216.0	9.0	0.1571	-0.215	-0.156	2.179	ok	7	-0.156	-0.215	2.179	-0.299	-0.092	1.695
8	0.267	4.3982	252.0	9.0	0.1571	-0.082	-0.253	2.179	ok	8	-0.082	-0.253	2.179	-0.296	-0.101	1.695
9	0.267	5.0265	288.0	9.0	0.1571	0.082	-0.253	2.179	ok	9	-0.082	-0.253	2.179	-0.190	-0.256	1.695
10	0.267	5.6549	324.0	9.0	0.1571	0.215	-0.156	2.179	ok	10	0.215	-0.156	2.179	-0.005	-0.313	1.695
11	0.297	0.0000	0.0	10.0	0.1747	0.295	0.000	2.174	ok	1	0.209	-0.250	1.692	0.209	-0.250	1.692
12	0.297	0.6263	36.0	10.0	0.1747	0.239	0.174	2.174	ok	2	0.022	0.325	1.692	0.316	-0.090	1.692
13	0.297	1.2566	72.0	10.0	0.1747	0.091	0.281	2.174	ok	3	0.091	0.281	2.174	0.302	0.121	1.692
14	0.297	1.8869	108.0	10.0	0.1747	-0.091	0.281	2.174	ok	4	-0.302	0.121	1.692	0.173	0.276	1.692

**Bild 2:** Eingabe und Berechnung für Kugelkoordinaten

Achse des WKS folgendes Aussehen erhält:

$$M_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad M_y = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2}$$

Raumpunkte im Weltkoordinatensystem werden mit vier Koordinaten dargestellt, wobei die letzte Koordinate immer 1 ist:

$$P = (x \quad y \quad z \quad 1)^T \quad \text{Gl. 3}$$

Um eine Drehung der Punkte um die festen WKS-Achsen vorzunehmen, muss daher dreimal hintereinander der Ortsvektor eines jeden Punktes mit  $M_x, M_y, M_z$  multipliziert werden.

## 2.2 Projektion

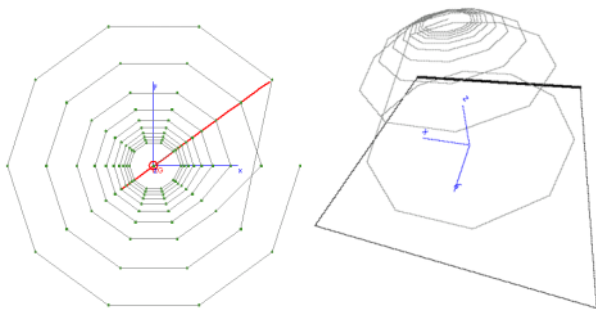
Im nächsten Schritt sind die Punkte durch eine weitere Transformation vom 3D-Raum auf eine 2D-Ansichtsebene  $d$  zu projizieren. Theoretisch wäre eine einfache Zentralprojektion auf eine Hauptebene durch Weglassen einer Koordinate möglich. Für an ansprechendere 3D-Effekte wird jedoch eine allgemeine perspektivische Projektionsmatrix gewählt:

$$M_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -d_x/d_z & z_p d_x/d_z \\ 0 & 1 & -d_y/d_z & z_p d_y/d_z \\ 0 & 0 & -z_p/q \cdot d_z & z_p^2/q \cdot d_z + z_p \\ 0 & 0 & -1/q \cdot d_z & z_p/q \cdot d_z + 1 \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 4}$$

## 2.3 Aufbau der Körper

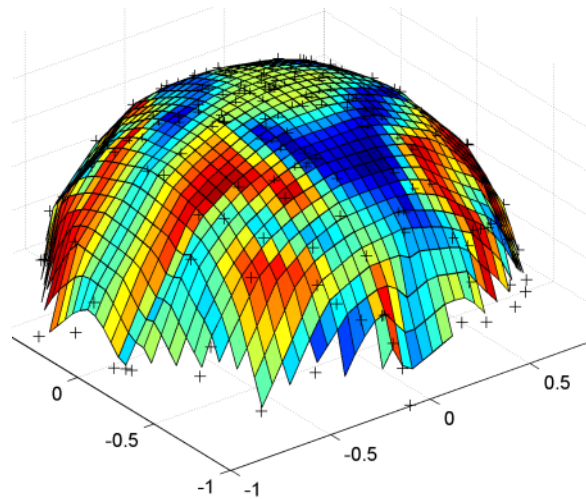
Die Körper werden als Wireframe Modelle aus reinen Linienzügen zusammengesetzt, **Bild 3**, so daß Füllflächenoperationen und Verdecktheitsprüfungen entfallen können. Es gibt innerhalb des Programms eine interne Liste, die alle relevanten Punkte der Geometrie enthält. Das sind die Punkte auf dem Bogen, die Positionen der Messmikrofone, der Boden und eine Achsdarstellung mit Beschriftung.

Zusätzlich werden die einzelnen Messpunkte aus der Exceltabelle und der Verfahrensweg mit abgebildet.



**Bild 3** Messpunktrajektorien von oben und schräg

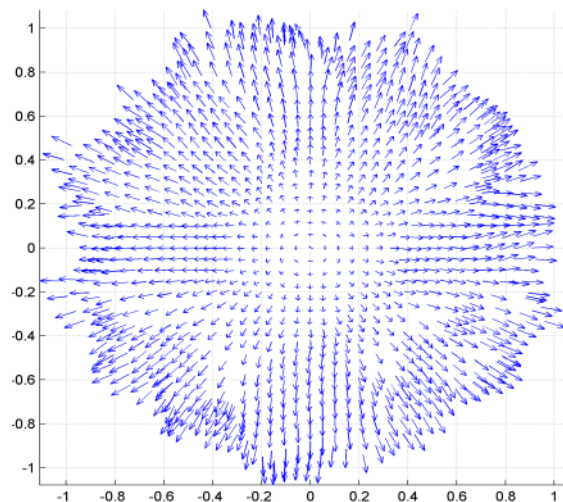
## 3 Darstellung der Ergebnisse



**Bild 4:** Messpunkte und Schallverteilung

Zur Darstellung der Ergebnisse wurde Matlab /2/ verwendet, das die oben beschriebenen Algorithmen als Befehle mit zusätzlichen Optionen bereitstellt. **Bild 4** zeigt die aus den zufällig verteilten Messpunkten (+) durch Triangulation berechnete Hüllfläche. Die Farbschattierung der Flächenelemente zeigt den interpolierten Schalldruckpegel an.

**Bild 5** ist ein Vektorplot auf einer sog. Isofläche von oben betrachtet. Die Vektoren zeigen die Ausbreitungsrichtung und Größe des Schalls an; die Fläche verbindet Orte gleichen Schallpegels.



**Bild 5** Vektorplot über Isofläche von oben

## 4 Zusammenfassung

Es wurde anhand von akustischen Messdaten die Arbeitsweise von 3D-Graphikalgorithmen und die Möglichkeiten bei der Auswertung dargestellt.

## 5 Literatur

- /1/ Stöcker, H. (Hrsg.): Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren. Deutsch, Frankfurt am Main, 1993
- /2/ <http://www.mathworks.com/support/>



## Lärmarm konstruieren XVIII - Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele

Backhaus, S.

*Um neue Produkte den Marktanforderungen entsprechend leise zu gestalten, gilt es dem maschinenakustisch unerfahrenen Konstrukteur ein Werkzeug an die Hand zu geben, das ihm die wichtigsten Grundgedanken und Konstruktionsregeln anschaulich erläutert. "Lärmarm konstruieren XVIII" von P. Dietz und F. Gummersbach leistet hierzu einen wesentlichen Beitrag.*

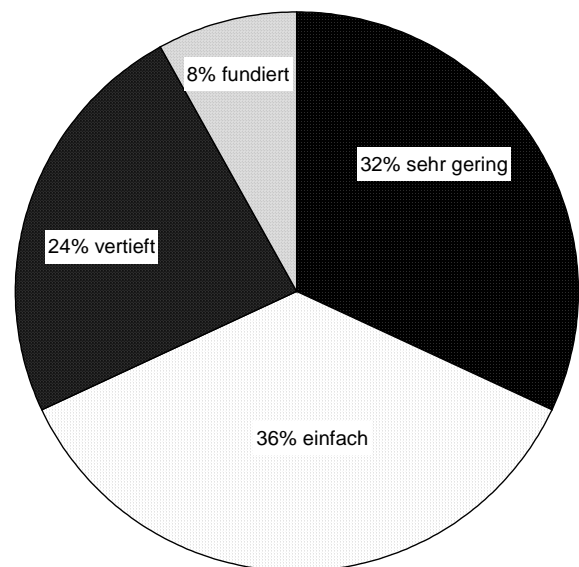
*To design quiet products for the new market requirements it is necessary to give a engineering-acoustic tool to the acoustic unversed designer which provides the fundamentals and design rules. "Lärmarm konstruieren XVIII" from P. Dietz and F. Gummersbach is a fundamental contribution for this.*

### 1 Einleitung

Maschinenakustische Produktanforderungen gewinnen seit geraumer Zeit aufgrund steigender Kundenwünsche und verschärfter gesetzlicher Bestimmungen für viele Industrieunternehmen immer mehr an Bedeutung. Wurde bei Konsumgütern ehemals besonders bei Produkten der gehobenen Preisklasse auf das Geräuschniveau geachtet, entwickelt sich aufgrund des immer stärkeren Wettbewerbs und Abgrenzungsdrucks zur Konkurrenz zunehmend auch im mittleren und unteren Preissegment eine Sensibilität für die Akustik. In der Investitionsgüterindustrie stellt sich allerdings ein ganz anderer Sachverhalt dar. Aufgrund der steigenden gesetzlichen Anforderungen, beispielsweise bei Produktionsanlagen, unterliegen die Hersteller immer höheren Anforderungen an die Lärmarmut ihrer Produktionsmaschinen. Daraus ergeben sich direkt erhöhte Anforderungen an die Konstruktionsabteilungen, denn der Konstrukteur legt während der Konstruktion die Wirkprinzipien und damit die maschinenakustischen Eigenschaften eines Produktes fest. In der klassischen Ingenieursausbildung jedoch spielt die Maschinenakustik keine beziehungsweise nur eine sehr untergeordnete Rolle (**Bild 1**).

Aufgrund dieser maschinenakustischen Unerfahrenheit werden bei der Konstruktion häufig akustisch ungünstige Verfahren gewählt oder technisch

günstige Verfahren akustisch ungünstig ausgelegt. Die Folge davon ist, dass eine mögliche Lärmproblematik meist erst in der Prototypenphasen oder gar erst bei der Markteinführung erkannt wird, zeit- und kostenintensive Nachbesserungen sind die Folge.



**Bild 1:** Umfrage zum maschinenakustischen Wissensstand von Konstrukteuren /2/

Diese Kosten lassen sich vermeiden oder zumindest vermindern, wenn schon bei der Entwicklung des Produktes auf gewisse maschinenakustische Grundregeln geachtet wird. Somit ist gerade für den maschinenakustisch unerfahrenen Ingenieur eine gezielte und einfache Bereitstellung von maschinenakustischem Grundwissen notwendig.

Aus diesem Anlass hat die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin das Institut für Maschinenwesen beauftragt sich eingehend mit diesem Thema zu befassen. Ergebnis dieser Arbeit ist ein Forschungsbericht in Buch als auch in CD-Rom Form.



Bild 2: Lärmarm konstruieren XVIII, /1/

## 2 Aufbau und Gliederung

Der Ausgangspunkt für den Aufbau und die Gliederung des Projektes war die ISO/TR 11688-1 "Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte; Teil 1: Planung" (DIN 45685-1) /3/. Sie "stellt eine Verknüpfung des Sachsystems "Maschinenakustik" mit dem Handlungssystem "Konstruktionsmethodik" her und orientiert sich an der üblichen Vorgehensweise der Konstrukteure", /1/. Die ISO/TR 11688-1 (/3/) umfasst jeden für die Maschinenakustik wichtigen Bereich und gibt für die aufgezählten maschinenakustischen Problemstellungen Handlungsanweisungen in Form von Konstruktionsregeln. **Bild 3** zeigt die Gliederung der Konstruktionsregeln nach /3/. Wichtig hierbei ist, dass jeder Abschnitt der Schallentstehungskette (Quelle, Übertragung und Abstrahlung) jeweils für alle Medien (Festkörper, Flüssigkeit und Luft) berücksichtigt wird.

Nach einer Einleitung wird zunächst auf die prinzipielle Vorgehensweise bei der Konstruktion lärmarmen Maschinen eingegangen. Die weiteren Kapitel des Buches orientieren sich an der in **Bild 3** dargestellten Gliederung. Jeder Abschnitt beginnt mit einer grundlegenden Einführung in die Problematik. Die zugehörigen Konstruktionsregeln werden anhand von ausführlichen Beispielen erläutert. Dabei wird detailliert auf die akustische Problematik im

jeweiligen Anwendungsfall eingegangen und mit Hilfe von Schaubildern die Anwendung der Konstruktionsregel beschrieben und deren Erfolg abgebildet.

**Bild 4** und **Bild 5** zeigen ein typisches Beispiel. An einer Papierförderanlage wird mittels pneumatisch betriebenen Saugnapfen Papier angesaugt, festgehalten, transportiert und anschließend wieder losgelassen. Beim Loslassen entsteht ein Druckabfall, der zu einem starken Ausströmgeräusch führt. Im genannten Beispiel wurde durch die Verdopplung der Anzahl der Saugnapfe eine Vergrößerung der ansaugenden Fläche erreicht, die es ermöglichte, den Druck im pneumatischen System zu verringern. Dies führt zu einem verringerten Ausströmgeräusch.

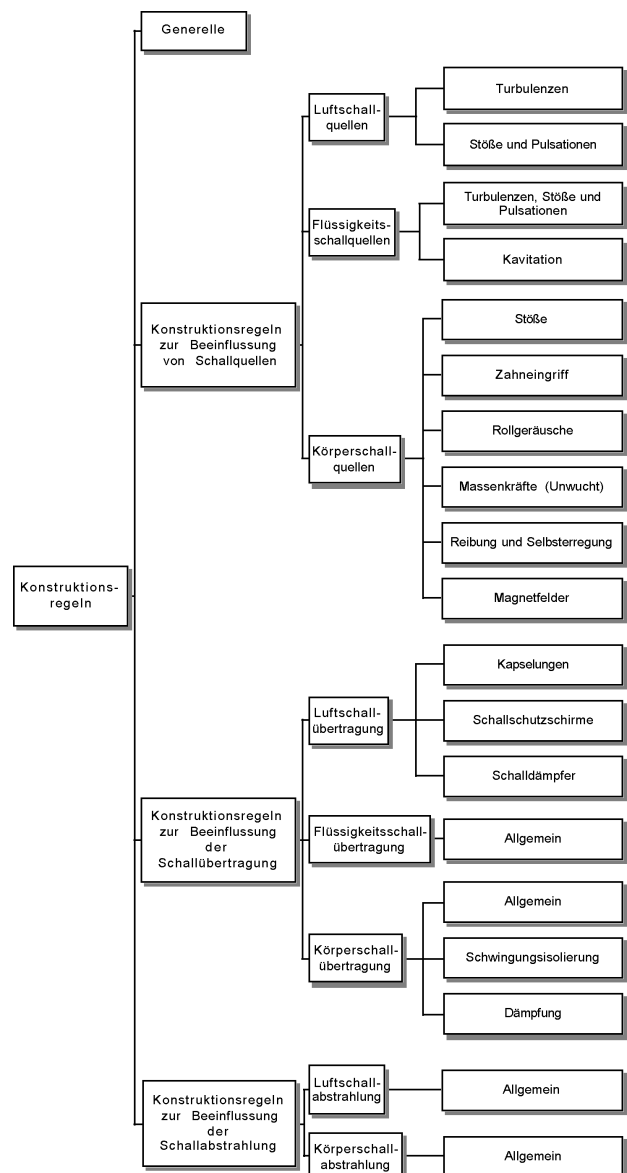
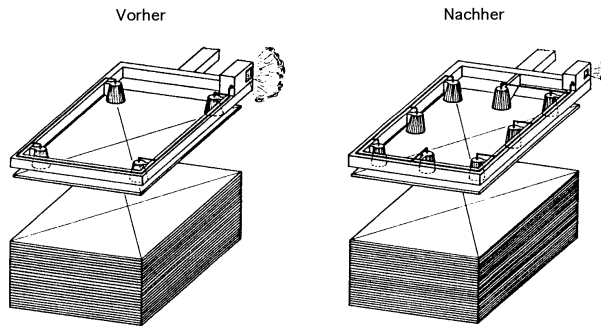
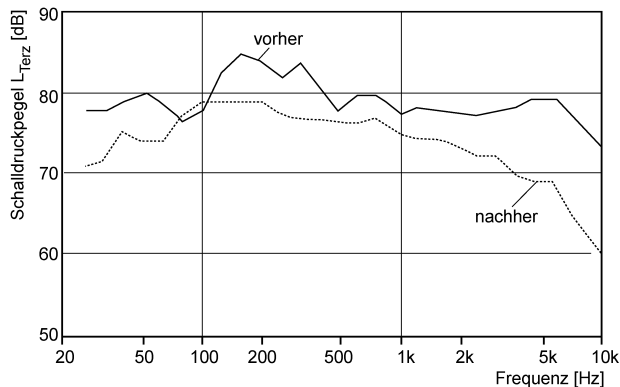


Bild 3: Gliederung der maschinenakustischen Konstruktionsregeln nach /3/



**Bild 4:** Papierförderanlage vor und nach der Lärminderungsmaßnahme /3/



**Bild 5:** Spektrum des Schalldruckpegels vor und nach der Lärminderungsmaßnahme /3/

Die im Buch gezeigten Praxisbeispiele stammen aus der aktuellen Forschung oder sind Ergebnisse von Weiterentwicklungen aus der Industrie. Die angegebenen Lärminderungen sind jedoch als Tendenzen zu verstehen, da sie nur für genau die aufgezeigten Beispiele gelten. Dennoch lässt sich daraus das realisierbare Potential erkennen um die Maßnahmen nach ihrer Wirksamkeit zu beurteilen.

### 3 Die CD-ROM zum Buch

Um die Möglichkeiten, die das Projekt bietet, voll ausschöpfen zu können, wurde dem Buch eine CD-ROM beigelegt. Diese CD-ROM enthält in der Hauptsache das Buch in elektronischer Form, zum einen im Adobe® Portable Dokument Format (PDF) der Firma Adobe®, zum anderen eine Version in HyperText Markup Language (HTML). Im Vergleich zur Printausgabe wurden hier allerdings ein paar kleine aber wesentliche Ergänzungen vorgenommen.

Ist das Inhaltsverzeichnis des Buches aus einer rein maschinenakustischen Sicht gegliedert, wurden die Online-Fassungen jeweils um eine branchenorientierte und eine komponentenorientierte Sichtweise ergänzt. Die Begriffe der einzelnen Branchen und der verschiedenen Komponenten sind das tägliche Brot jedes Konstrukteurs. Damit

wird dem Ingenieur die anfängliche Suche nach der Lösung zu seinem maschinenakustischen Problem so einfach wie möglich gemacht.

Um zu verdeutlichen, was die Neugliederung der Konstruktionsbeispiele aus branchen- und komponentenorientierter Sicht bedeutet, ist folgendes Beispiel aufgeführt. Die in **Bild 4** dargestellte Papierförderanlage findet sich in der maschinenakustischen Gliederung unter: Beeinflussung der Schallentstehung → Luftschallquellen → Turbulenzen in Gasen → Papierförderanlage; aus Branchenorientierter Sicht unter: Druck- und Papiertechnik → Papierförderanlage; und aus komponentenorientierter Sicht unter: Elemente der Fluidtechnik → Düsen → Papierförderanlage. Diese Einteilungen machen es möglich zu jedem Problem ein passendes Beispiel zu finden. Sollte dies dennoch nicht ausreichen kann das PDF-Dokument im Volltext, die HTML-Version abschnittsweise nach einzelnen Wörtern durchsucht werden.

Aufgrund der Programmierung im HTML- und PDF-Format sind die Online-Ausgaben auf jeder gebräuchlichen Rechnerplattform (Windows®-PC, Unix-Workstation und Apple Macintosh) einsetzbar. Eignet sich die PDF-Ausgabe vor allem zur direkten Installation auf der Festplatte eines Rechners, kann die HTML-Version über das firmeninterne Intranet jedem Mitarbeiter zur Verfügung gestellt werden. Zur Darstellung kann bei der HTML-Version jeder handelsübliche Internetbrowser verwendet werden. Für die PDF-Datei wird der frei erhältliche Adobe® Acrobat® Reader® benötigt.

### 4 Bezugsquellen

Das Buch "Lärmarm konstruieren XVIII - Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele" von P. Dietz und F. Gummersbach, gefördert und herausgegeben von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, mit der ISBN 3-89701-525-0 kann unter folgender Adresse

Wirtschaftsverlag NW-Verlag  
für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10  
D-27 511 Bremerhaven  
Telefon (0471) 94544-61  
Telefax (0471) 94544-88  
E-Mail: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
<http://www.nw-verlag.de> ,

unter <http://www.buchhandel.de> oder im Buchhandel bezogen werden.

## **5 Zusammenfassung**

Aufgrund der sich immer weiter verschärfenden maschinenakustischen Anforderungen an die Produkte von heute ist es notwendig, dem maschinenakustisch unerfahrenen Konstrukteur ein Werkzeug an die Hand zu geben, das ihm die maschinenakustischen Konstruktionsregeln anschaulich anhand von praxisnahen Konstruktionsbeispielen erläutert. Das Buch "Lärmarm konstruieren XVIII - Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele" inklusive der Online-Versionen auf CD-ROM bietet hier mit verschiedensten Darstellungs- und Suchfunktionen eine wesentliche Hilfestellung.

## **6 Literatur**

- /1/ Dietz, P.; Gummersbach, F.: Lärmarm konstruieren XVIII - Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele, Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, 2001
- /2/ Haje, D.; Gummersbach, F.; Schmidt, A.: Inquiry Results about Low Noise Design; Clausthal; 1994; unveröffentlicht
- /3/ DIN EN ISO 11688-1; Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte - Teil 1: Planung, 1998; (ISO/TR 11688-1; 1995); Deutsche Fassung EN ISO 11688-1; 1998

## Welches Fügeverfahren hat die besten Dämpfungseigenschaften?

Käferstein, B.

*Im Rahmen eines Forschungsprojekts, das von der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. am Institut für Maschinenwesen gefördert wird, wird untersucht, wie groß die Fügestellendämpfung bei verschiedenen Fügeverfahren an dünnen Blechen ist. Das Ziel ist eine Auswahlhilfe zu bekommen, welche Verfahren an welcher Stelle in einer Struktur am sinnvollsten sind, um das Schwingungsverhalten zu optimieren. Im folgenden sind einige Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen dargestellt.*

*The Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., a German research association promotes a project at the IMW for the measurement and comparison of damping coefficients of different joining techniques. The aim is to obtain rules for the selection of the appropriate methods depending on the position in the structure. The following articles describes some results of the performed measurements to optimise the vibration behaviour of structures.*

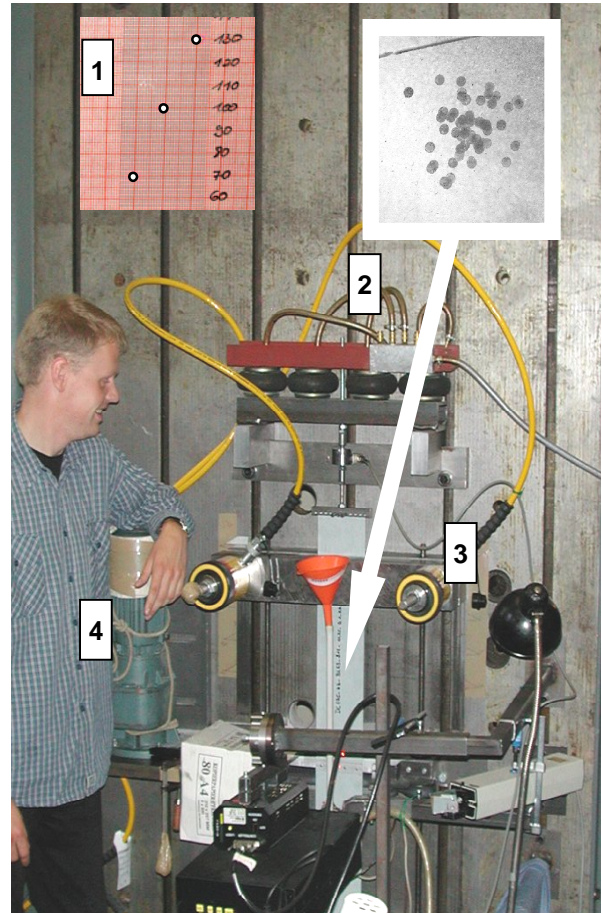
### 1 Einleitung

Aus den Vorversuchen mit einem vereinfachten, liegenden Prüfstand hatte sich die Notwendigkeit ergeben, einen größeren Prüfstand in stehender Bauweise mit berührungslosen Schwingungsaufnehmern zu errichten, **Bild 1**. Die Probengeometrie sollte in Anlehnung an DIN 53440 als Biegeprobe ausgeführt werden. Daher wurden die Prüfmuster axial vorgespannt und beidseitig fest geklemmt. Die Anordnung ist vertikal, um Schwerkrafteinflüsse zu eliminieren.

### 2 Messung

#### 2.1 Messaufbau

Die Schwingungssignale werden nun jeweils ober- und unterhalb der Fügestelle mit seitlichem Versatz optisch durch Laservibrometer erfasst (1), wodurch die verschiedenen Schwingungsmoden identifiziert werden können. Die Vorspannung wird pneumatisch aufgebracht (2) und die Fixierung erfolgt separat über geschliffene Klemmbacken mit Führung (3). Diese werden hydraulisch gespannt und elektrisch verfahren (4). Die Klemmkraft ist proportional der Blechbreite und die Klemmbacken so optimiert,



**Bild 1:** Prüfstand mit Schussbild der Kugeln und Lasermesspunkten

dass die Pressung möglichst homogen ist. Die Anregung erfolgt neben der Fügestelle reproduzierbar durch eine pneumatische Schußvorrichtung und Kunststoffkugeln. Damit erhält man ein tieffrequentes Anregungsspektrum, so dass die höheren Harmonischen leichter identifiziert werden.

#### 2.2 Untersuchte Proben

Die Planung des Versuchsumfangs erforderte eine Beschränkung auf die Variation wichtiger Parameter. In **Tabelle 1** sind die untersuchten Parameter und deren Einstellstufen aufgelistet. Für die Versuche wurden Werkstoff, Oberfläche und Fügestellengröße pro Verfahren konstant gelassen. Für jeden Probenotyp wurden zur Eliminierung von Schwankungen drei Probenkörper angefertigt, die je mit 5 Schüssen pro Einspann-/Längenkombination angeregt wurden. Die Breite wurde in 4 Stufen, die Überlappung, die axiale Vor-



Material 1 Werkstoff und Dicke	Surface quality 2 Oberfläche	Method 3 Verfahren	Size of joint 4 Größenangabe Fügestelle
DC075 DC 05, S= 0,75 mm DC100 DC 05, S= 1,0 mm	Zb beids. Elek. verz., Un unbehandelt (blank)	OO glatter Probestab (no joints) Bl Blindnieten (blind riveted) Cr Clinchen Rundpunkt (clinched) Kg Kleben (glued green) Kb Kleben (glued blue) Ll Laserlinienschweißen (laser welded) Pu Punktschweißen (spot welded) Sc Schrauben (screwed) St Stanznieten (punch riveted)	OO 0 mm 65 3x5, Setzkopf d=6,5 mm 50 Rundpunkt d=5mm w*o Klebfläche cm² (glued area cm²) w*o i.e. width x overlap xx Schweißnahtbreite in 1/10 mm 45 Linsen-D 4,5 mm, bei S=0,8 55 Kopf-D = 5,5 bei M3 35 Halbhohlstanzniet: D 3,5x4
Width 5 Breite	Overlap 6 Überlappung	Pattern and number of joints 7 Fügestellenzahl und Anordnung	Special tag 8 Sonderkennzeichnung
B30 30 mm B60 60 mm B90 90 mm B120 120 mm	U20 20 mm U25 25 mm U30 30 mm U50 505 mm	Q1 eine quer zum Streifen (joints perpendicular) L1 längs, 5 entlang des Streifens (5 joints) L2 längs, 9 entlang des Streifens (9 joints) L3 längs, 17 entlang des Streifens (17 joints) M1 Muster 1 etc. (special pattern type)	KK Keine (No tag) La Lange Probe (long specimen) Vg vorgespannt (prebended) Oe Ölbehandelt Zy Zyklisch belastet
Running number 9 lfd. Proben-Nr.			
xx 01 etc.			

Example: Specimen made from mild steel of 0.75 mm thickness and zinc surface. Joining method clinching with 25 mm overlap and 2 joints perpendicular to spec. axis. The second spec. of three is to be tested.

**DC075\_Zb\_Cr50\_B60\_U25\_Q1\_KK\_02**

tional Instruments aus Mönchengladbach, Medusa von Mahrenholtz & Partner aus Hannover und Matlab von The MathWorks eingesetzt. Mit DasyLab, einem graphischen Tool zum Steuern von Messwertrechnersystemen, werden die Daten erfaßt und gespeichert.

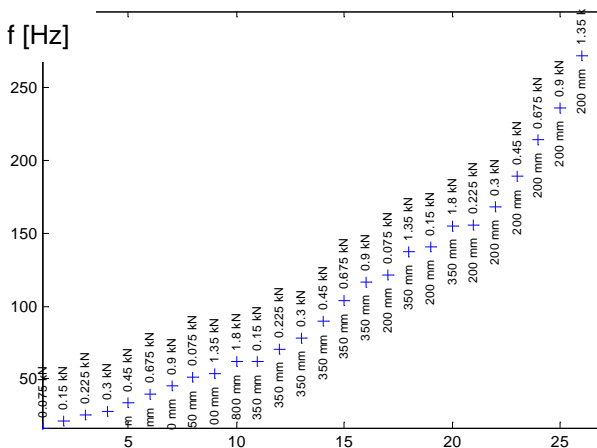
**Tabelle 1:** Untersuchte Parametervariationen

spannung und die Klemmlänge in je 3 Stufen variiert. Zusätzlich wurden alternative Proben mit 5, 9, und 17 Fügestellen in Längsrichtung angefertigt, um besser den Einfluß der Anordnung erfassen zu können. Damit ergibt sich ein Untersuchungsumfang von ca. 2580 Einzelversuchen.

Mit einer Meßzeit von 20 s pro Ausschwingvorgang ergeben ca. 80 h auszuwertende Zeitdaten mit 35Gbyte Speichervolumen. Da auch Frequenzabhängigkeit der Dämpfung untersucht werden sollte, müssen geeignete Vorspannungs-/ Einspannlängenkombinationen ausgewählt werden. Um einen gleichmäßigen Verlauf der Meßpunkte über die Frequenz zu erreichen wurden anhand von FE-Rechnungen sinnvolle Klemmlängen/ Vorspannkraft-Verhältnisse errechnet, **Bild 2**.

### 2.3 Auswertung

Zur Auswertung der Daten wurde DasyLab von Na-



**Bild 2:** Frequenzen verschiedener Längen/ Vorspannkombinationen

### Dämpfungsgrad (Lehrsches Dämpfungsmaß)

$$D = \frac{\delta}{\omega_0} = \frac{d}{2m\omega_0}$$

*m: Masse*

*$\omega_0$ : Eigenfrequenz*

$$D_r = \frac{\Lambda_r}{\sqrt{4\pi^2 - \Lambda_r^2}}$$

### Ausschwingkurve

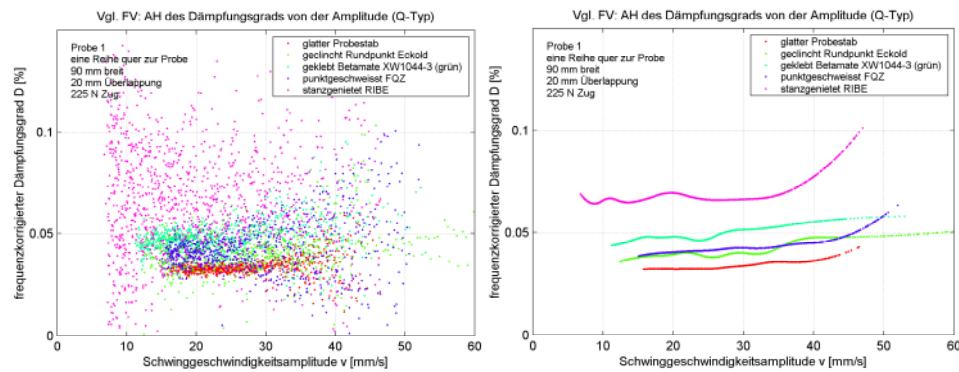
$$A(\tau) = A_0 e^{-D\tau}$$

*dimensionslose Zeit*

*(=laufende Phase in [RAD])  $\tau = \omega_0 t$*

**Bild 3:** Formeln für D

Medusa berechnet mit einem speziellen Optimierungsverfahren die gesuchten Frequenz- und Dämpfungswerte in Abhängigkeit von der Amplitude durch eine Schwingungsanalyse im Zeitbereich. Diese "VADT" ist zwar sehr rechenaufwändig, liefert aber sehr genaue Ergebnisse bei schon wenigen Schwingungsperioden. Matlab wurde zur Steuerung der Auswertung, Ergebnisvisualisierung und Datenhaltung verwendet. Ausgewertet wurden acht Perioden der tiefsten Frequenz im Signal mit einer 60%-igen Überlappung des Auswertebereichs. Als Ergebnis wurde der Dämpfungsgrad D, **Bild 3**, angegeben, der dem Exponenten in den Abklingkurven bei dimensionsloser Zeitdarstellung entspricht. Die dimensionslose Zeit errechnet sich aus der tatsächlichen Meßzeit und der Kreisfrequenz, so dass sich Ausschwingvorgänge bei verschiedenen Frequenzen vergleichen lassen. **Sie entspricht dem insgesamt durchlaufenen Phasenwinkel.**



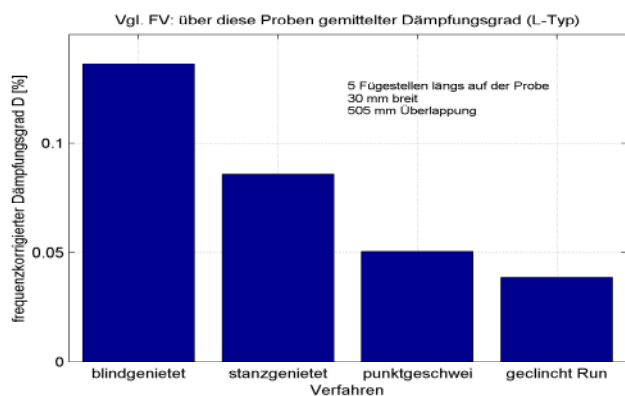
**Bild 4:** Dämpfungskurven vor und nach der Spline-Interpolation

Die Dämpfungswerte unterliegen sehr starken Streuungen. Daher muss durch eine Mittelung der tatsächliche Verlauf über der Amplitude errechnet werden, **Bild 4**. Dazu wird die gemessene Punktwolke durch abschnittsweise Spline-Interpolation nach dem Least-Squares-

Verfahren genähert, so dass der Kurvenverlauf eindeutig zu erkennen ist. Da sich aufgrund geringer Massen- und Steifigkeitsunterschiede der Proben unterschiedliche Frequenzen einstellen, muss zusätzlich eine Vergleichsbasis mit einer festen Bezugsfrequenz geschaffen werden. Es wird eine gemittelte Frequenz herangezogen, auf die mit einem Ein-Massen-Schwinger-Ansatz der Dämpfungsgrad umgerechnet wird.

### 3 Ergebnisse

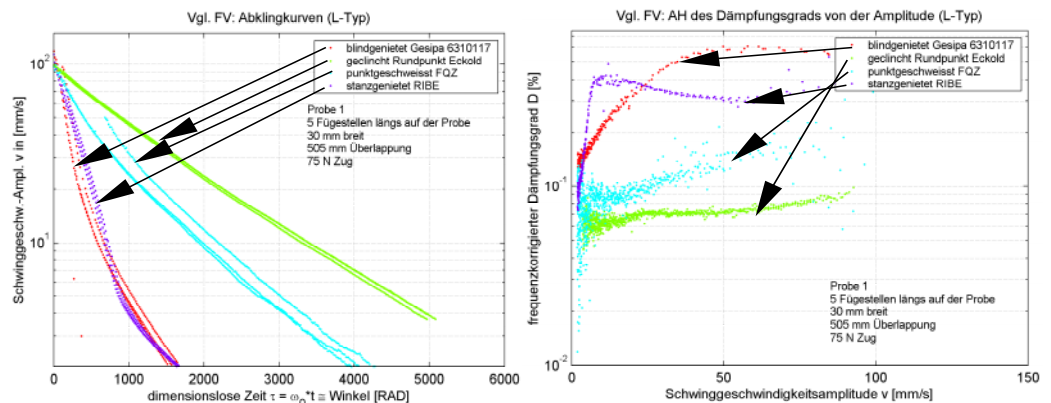
In **Bild 4** werden für einige Verfahren die Struktur-dämpfungswerte für die verschiedenen Längspro-



**Bild 5:** Gemittelte Dämpfungswerte

bentypen gegenübergestellt. Sie wurden durch Mittelung über alle Frequenzen und Vorspannungen errechnet. Es zeigt sich, dass mit steigender Fügestellenanzahl die Struktur-dämpfung nicht zwangsweise zunehmen muss und

dass offensichtlich das Fügeverfahren mit den meisten Berührflächen und der geringsten Steifigkeit im Kontaktbereich die größte Dämpfung hat. Zudem scheint die Bewegungsmöglichkeit der Bleche zwischen den Fügestellen stärker die Dämpfung zu



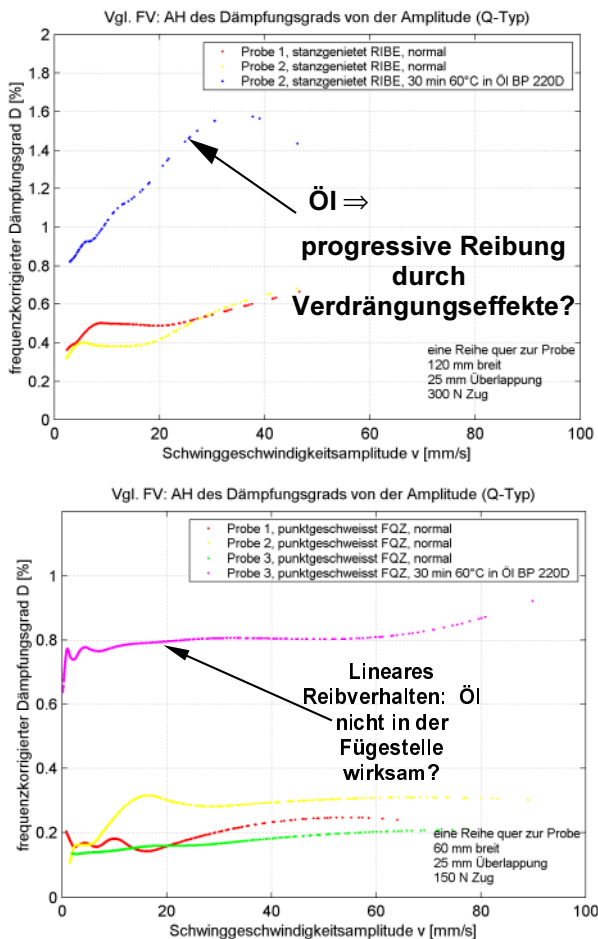
**Bild 6:** links: Abklingkurve im log-Maßstab über die Zeit; rechts: Dämpfungsverlauf über die Amplitude (entspricht in etwa der Ableitung)

verringern als die Anzahl der Fügestellen.

Deutlicher erkennen lassen sich die auftretenden Mechanismen, wenn man den Dämpfungsverlauf über die Schwingamplitude aufträgt, **Bild 6, r**. Unterschiedliche Steigungen der Abklingkurven bedeuten unterschiedliche Dämpfungsfaktoren (I.). Je größer der Abfall, desto höher die Dämpfung. Bei einigen Fügeverfahren (Stanznieten und Blindnieten) tritt ein auffälliger Knick in den Kurven auf, d.h. es findet eine Art „Umschalten“ im Reibverhalten statt, dessen Ursachen noch näher zu eruieren sind.

In **Bild 7** wird der Einfluss eines viskosen Mediums (Öl) diskutiert, das nachträglich in die Fügestelle eingebracht wurde. Es zeigt sich, dass die Struktur-dämpfung deutlich durch ein viskoses Medium erhöht werden kann. Die Auswirkungen sind je nach Fügeverfahren und Kinematik im Fügestellenbereich unterschiedlich stark. Der Verlauf der Kurven für Punktschweißen und Clinchen sind sich ähnlich, bei den blindgenieteten und stanzgenieten

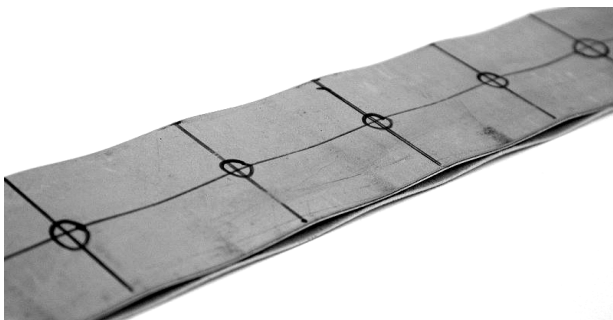




**Bild 7:** Dämpfungsverlauf bei viskosem Medium und stanzgenietet (oben) und punktgeschweißt (unten) Verbindung

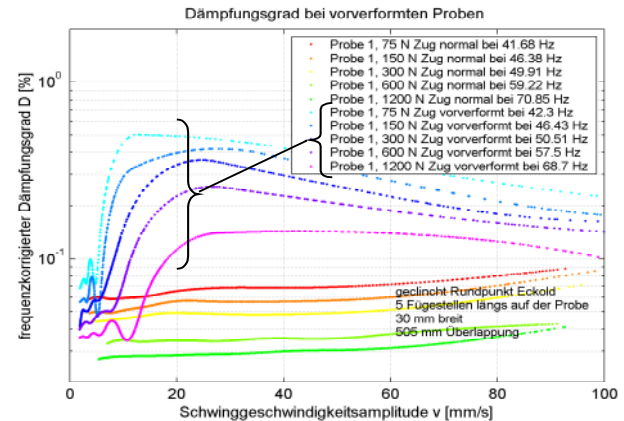
Blechen treten nichtlineare Effekte z. B. durch Verdrängung des Öls deutlicher hervor.

Da der Einfluß der Pressungsverteilung zwischen den Fügestellen offensichtlich groß ist, wurde ein weiterer Versuch unternommen, bei dem Längsproben mit Vorspannung zwischen den Fügestellen hergestellt wurden. Dazu wurden die Bleche vorgebogen, **Bild 8**, so dass eine Aufwölbung an der Stelle entstand, an der die Fügung zu setzen war.



**Bild 8:** Vorgebogene Bleche zur Erhöhung der Reibung zwischen den Fügestellen

Es zeigt sich, dass durch die Druckvorspannung das Reibverhalten zwischen den Fügestellen verbessert wird, **Bild 9**, da dort die geringste Steifigkeit und damit auch die größte Bewegungsmöglichkeit zur Energiedissipation vorhanden ist. Bei geringer Anzahl der Fügestellen sind die Reibeffekte größer, da aufgrund der kleineren Steifigkeit die Elastizität höher ist, als bei eng gesetzten Fügestellen.



**Bild 9:** Deutliche Erhöhung der Reibung durch Vorbiegen

#### 4 Ausblick

Aus Dickenmessungen und Pressungsmessungen soll zusätzlich auf die Reibverhältnisse im und um den Fügestellenbereich geschlossen werden. Dazu werden neben der Vermessung der Oberflächen zur Abschätzungen des Fügespalts auch Untersuchungen an Schliffbildern vorgenommen, die Aufschluß über den Kontaktpalt zwischen den Blechen geben.

#### 5 Zusammenfassung

Fügestellen können durch Mikroschlupf die Dämpfung in Strukturen erhöhen. Dabei gibt es deutliche Unterschiede zwischen "weichen" und "steifen" Fügeverfahren. Je mehr Kontaktflächen in der Fügezone vorhanden sind, oder je kleiner die Vorspannungen bzw. die Pressungen sind, desto kleiner ist auch die Bewegungsmöglichkeit und damit die Dissipation. Es ist zu beachten, dass die vorliegenden Werte ausschließlich strukturdynamische Dämpfungswerte für die untersuchten Probengeometrien sind. Für die Ermittlung der reinen Dämpfungswerte einer Fügestelle ist die Materialdämpfung bei der entsprechenden Schwingungsform zu eliminieren.

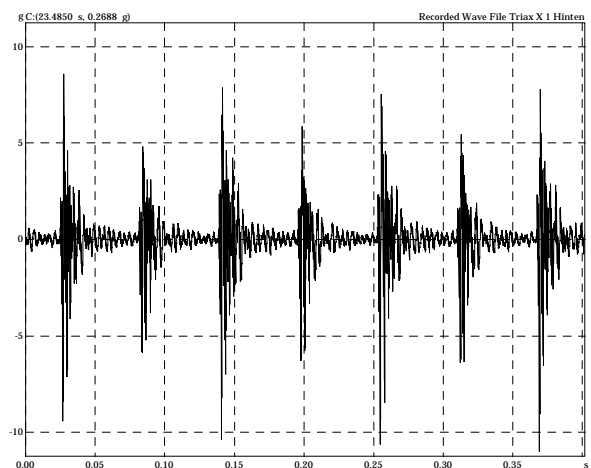
## Lärminderung an einer Prägeeinheit

Backhaus, S.; Käferstein, B.

Für die Herstellung von Filtersystemen aus Vlies werden Prägeeinheiten eingesetzt. Neben dem Aufbringen von produktspezifischen Mustern werden einzelne Filterelemente durch starkes Aneinanderpressen und Verformen der Vliesbahnen gefügt oder auch getrennt. Aufgrund der hohen Durchlaufgeschwindigkeit der Bahnen von ca. 3 m/s und den hohen Kräften im Prägekontakt entsteht ein sehr laut schlagendes bzw. ratterndes Geräusch. Das Geräusch ist so laut, dass arbeitsschutzrechtliche Vorgaben nicht mehr erfüllt wurden. Es mußte ein neues Konzept für eine Prägeeinheit entwickelt werden, das bei gleicher Produktionsleistung und -qualität die gleichen Aufgaben bei deutlich reduzierter Lärmentwicklung übernimmt.

The manufacturing of filters from non-woven material requires a stamping process. Additionally to embossing brand signs the deformation under high pressure is used to join or cut the fleece. Due to the high speed of 3 m/s per lane and the high forces in the contact zone a very noisy clattering and percussive sound is emitted. The emission is louder than the limits in safety and health regulations. The aim was to develop a new concept for a stamping machine with the same productivity and quality but with significantly decreased sound emission.

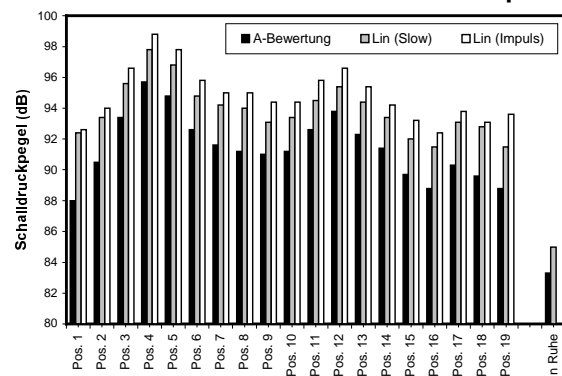
sich auch die Prägevorrückung befindet, wurden relativ starke impulsförmigen Geräuschanteile ausgemacht. Beim Prägevorgang wird das Material mittels eines Walzenstempels auf eine Matrize gedrückt. Beide sind aus gehärtetem Material und auf Walzen montiert. Während des Arbeitsvorgangs läuft der Stempel in die Matrize ein und erzeugt hierdurch eine stoßförmige Anregung und impulsförmige Geräuschanteile. Diese breiten sich als Körperschall in Form von gedämpften Strukturschwingungen aus, **Bild 2**.



**Bild 2:** Körperschall der Prägeeinheit nach dem Prägestoß

### 1 Vorgehensweise

#### 1.1 Suche nach der stärksten Schallquelle

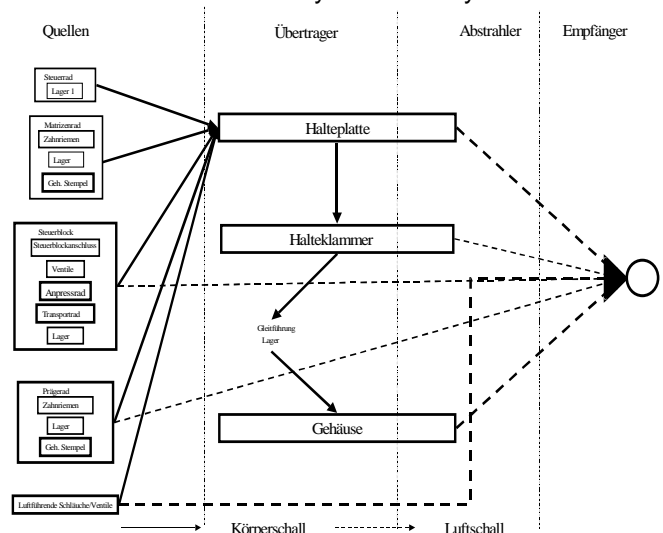


**Bild 1:** Pegelverlauf längs der Fertigungsanlage

Um einen Überblick bezüglich der Lärmbelastung entlang der Fertigungsanlage zu erhalten, wurde der Schalldruckpegel vor den Einheiten gemessen, **Bild 1**. An der geräuschintensivsten Stelle, an der

#### 1.2 Schallflussanalyse der Prägeeinheit

Ein Schallflussplan, **Bild 3**, ist die theoretische maschinenakustische Analyse eines Systems um ei-



**Bild 3:** Schallflussplan

nen besseren Überblick über Ansatzpunkte für lärmindernde Maßnahmen zu bekommen. Er überführt die Anlage in eine abstrahierte Darstellung zur Verdeutlichung des Schallpfades, von der Schallquelle über die Übertragung bis zur Abstrahlung. Die einzelnen Elemente werden identifiziert, graphisch angeordnet und bewertet, **Bild 4**. Die Analyse wurde nach der ISO-11688-1 /1/ an Zeichnungssätzen der Prägeeinheit durchgeführt.

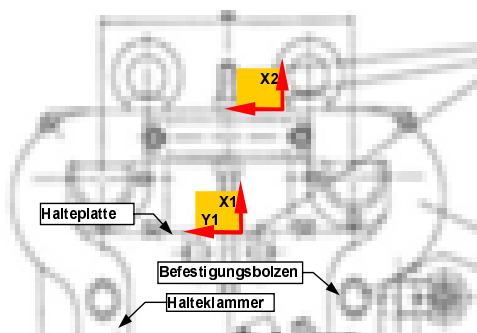
Schallquellen	Relevanz	K	L	Beschreibung
Antriebsrad	B	X		Zahneingriffsstöße
	C		X	Druckpulsation
	B/C	X		Rollgeräusche
Gleitführung	C	X		Rollgeräusche
Schmiersystem	C	X		Rollgeräusche
Stempel	B	X		Zahneingriffsstöße
	C		X	Druckpulsation
	B		X	Rollgeräusche

**Bild 4:** Aufstellen der Quellen und Priorisierung

In gleicher Weise wird mit den Übertragern und Abstrahlern verfahren.

## 2 Messungen

### 2.1 Messaufbau



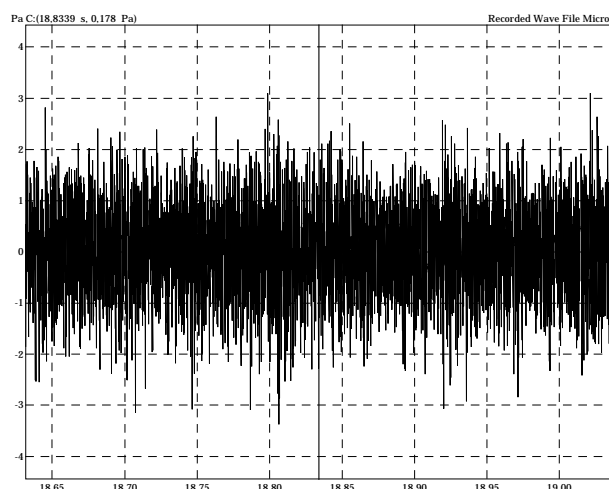
**Bild 5:** Positionierung der Aufnehmer

Für den Messaufbau wurde ein mehrkanaliger Signalanalysator mit Offlineauswertung eingesetzt. Es wurden Körperschallsignale und ein Luftschallsignal über einen Zeitraum von jeweils 60 Sekunden aufgezeichnet. Die Körperschallaufnehmer wurden einerseits direkt an der Prägeeinheit montiert als auch an der zugehörigen Halteklammer, **Bild 5**. Damit sollte das Schwingverhalten des Grundkörpers nach der Stoßanregung und die Körperschallübertragung in den Rahmen untersucht

werden. Die Aufnahme des Luftschalls wurde herangezogen, um festzustellen, wie groß der Beitrag der Prägeeinheit am Gesamtschallpegel der Anlage ist.

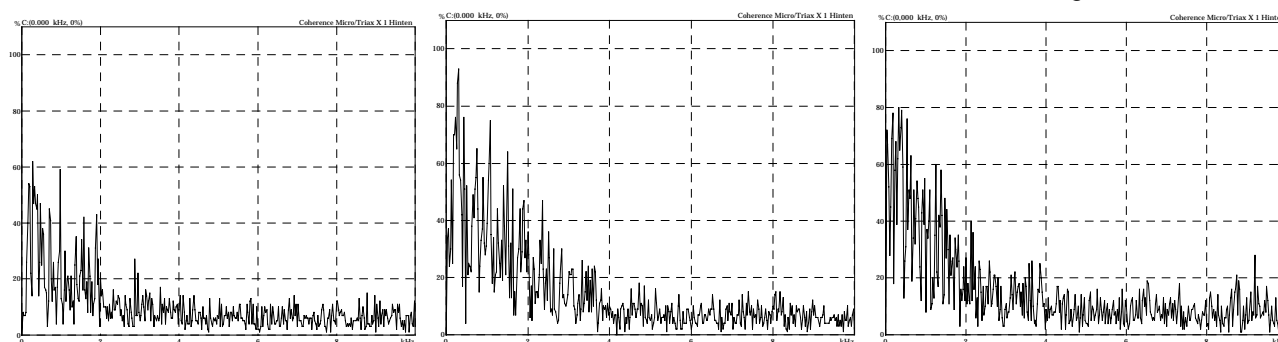
### 2.2 Ergebnisse

Da in der Produktionsstätte mehrere Anlagen im Einsatz sind, ist der Grundsallpegel sehr hoch, Bild 1. Berechnungen der Kohärenz zwischen dem Körperschall und dem Luftschall, **Bild 7**, zeigten, dass die Anteile des von der Einheit abgestrahlten Schalls direkt vor der Prägeeinheit am größten sind, **Bild 6**. Im Vergleich zum Gesamtschall ist dieser Anteil jedoch relativ klein, obwohl man subjektiv das ratternde Geräusch stark wahrnimmt.



**Bild 7:** Luftschallsignal direkt vor der Prägeeinheit

Aus dem Zeitverlauf in Bild 7 erkennt man, dass die Höhe der Impulse verschieden ist. Das liegt an der unterschiedlich starken Vorspannung der Prägestempel, von denen jeweils zwei auf einem Rad befestigt sind. Die Anregung durch den Stoß dominiert mit 30-facher Überhöhung gegenüber dem Grundsallverhalten. Die Schwingung ist bereits sehr stark bedämpft und klingt innerhalb weniger Perioden ab. Lärminderungsmaßnahmen, die nur die Dämpfung erhöhen sind daher nicht ausreichend. Der Umstieg auf einen anderen Wirkmechanismus mußte deshalb bevorzugt bei der Lö-



**Bild 6:** Kohärenz zwischen Luftschall und Körperschall für die Mikrofonpositionen links, direkt vor und rechts von der Prägeeinheit

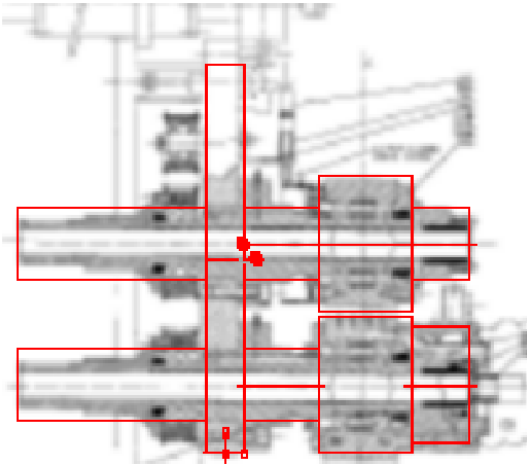
sungsfindung betrachtet werden.

### 3 FEM-Rechnungen

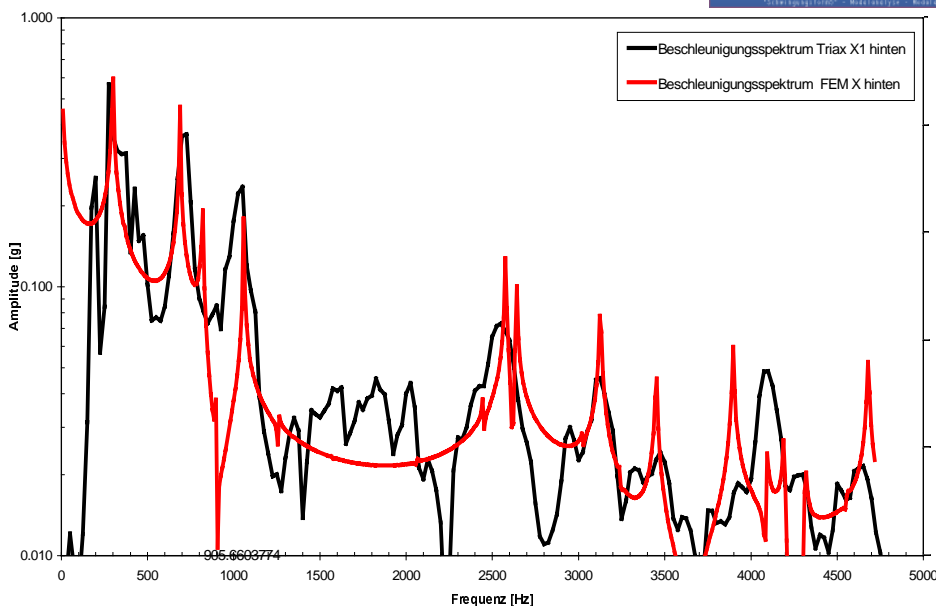
Um die Ursachen für die hohen Peaks in den Frequenzspektren, **Bild 9**, genauer deuten zu können, wurde eine Modalanalyse mit nachfolgender harmonischer Analyse vorgenommen.

#### 3.1 Modellbildung

Die Prägeeinheit, bestehend aus den zwei Walzen, den Spindeln und der Grundplatte zur Befestigung, wurde durch ein sehr einfaches mechanisches Ersatzmodell abgebildet, **Bild 8**. Aus den Zeichnungen wurden die groben Abmessungen entnommen und die Massen als Vollzylinder ohne Berücksichtigung von Fügestellen, Lagern oder Kleinteilen modelliert.



**Bild 8:** Modellbildung- durch einen groben Blick

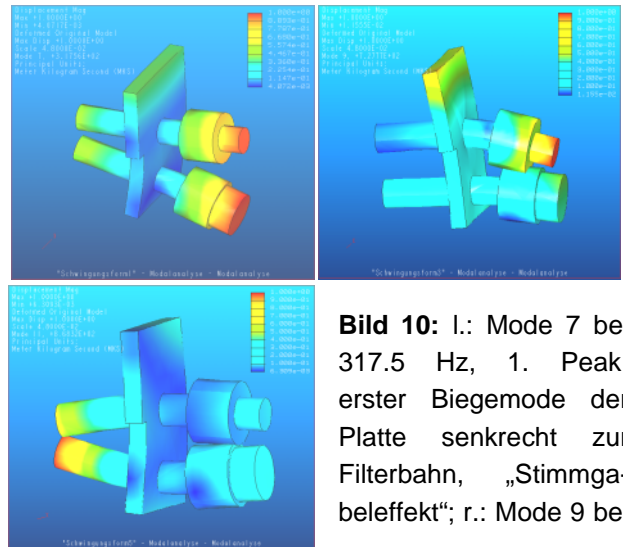


**Bild 9:** Frequenzspektrum des Körperschallsignals an der Platte Messung und FEM-Ergebnisse

#### 3.2 Modalanalyse

Um das Eigenschwingungsverhalten des Moduls zu bestimmen, wurde eine Modalanalyse durchgeführt, die als Ergebnis unskalierte Eigenschwingungsformen und die zugehörigen Frequenzen lieferte. Die Schwingungen der Einzelbauteile wie z. B. der Walzen haben so hohe Frequenzen, dass die drei charakteristischen Frequenzpeaks im Spektrum bis 1000 Hz, Bild 8, von einer Mode des Gesamtsystems stammen mußten.

Insgesamt wurden in diesem Frequenzband 34 Eigenschwingungsformen gefunden. Für die Rechnung wurde aufgrund der punktförmigen und sehr weichen Lagerung der Grundplatte durch die Halteklammer auf eine Fesselung verzichtet. Die Halteklammer wurde wegen ihrer kleinen Massen ebenfalls vernachlässigt.



**Bild 10:** l.: Mode 7 bei 317,5 Hz, 1. Peak, erster Biegemode der Platte senkrecht zur Filterbahn, „Stimmgabelbeffekt“; r.: Mode 9 bei

727,7 Hz, 2. Peak, erster Biegemode der Platte senkrecht zu den Prägewellen; u.: Mode 11 bei 868,3 Hz, 3. Peak, 1. Harmonische zu Mode 7

**Bild 10** zeigt für die ersten Peaks im Frequenzspektrum die zugehörigen Eigenformen. Der Stoß beim Einlaufen der Filterbahn in die Prägerollen induziert eine Anregung senkrecht zur Bahn auf beide Wellen. Das führt im wesentlichen zur Anregung von synchronen Biegeschwingungen der Spindeln. Da diese weit auskragen und auf einer relativ biegeweichen Platte befestigt sind, hat die Konstruktion einen stimmgabelähnlichen Aufbau, der

sich im Schwingverhalten sehr negativ auswirkt.

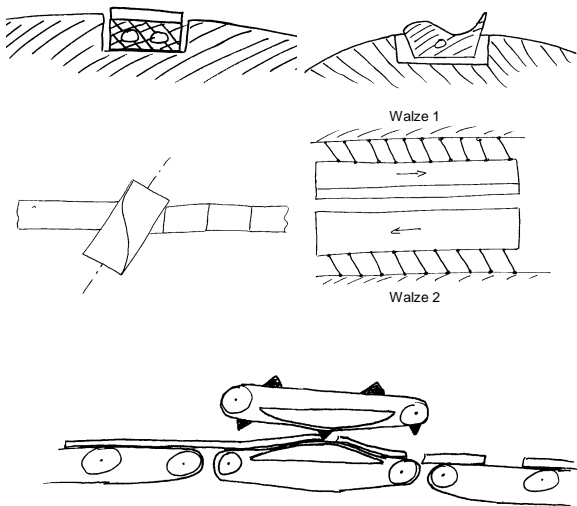
### 3.3 Analyse des Impulsantwortspektrums

Auf Basis der Modalanalyse wurde noch eine FEM-Analyse mit Stoßanregung im Prägespalt vorgenommen. Der Kraftverlauf des Stoßes, der durch den Prägevorgang erzeugt wird, war nicht bekannt, so dass eine gleichmäßige Frequenzanregung vorausgesetzt wurde. Das Antwortspektrum in Bild 9 zeigt trotz der sehr groben Vereinfachung eine außergewöhnlich gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Körperschallspektrum. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Hauptschwingungsanteile der Prägeeinheit durch stimmungsgabelartige Biegeschwingungen der Wellenenden hervorgerufen werden.

## 4 Lösungsvorschläge

Für die Lösung des Problems wurden Maßnahmen an der Quelle und an der Übertragungsstrecke in einem Brainstorming erarbeitet. Zur Reduzierung des Prägestoßes und der damit verbundenen Impulsanregung kommt entweder nur die zeitliche Dehnung des Kräfteverlaufs oder die Reduzierung der Maximalkraft in Frage. Das Übertragungsverhalten kann verändert werden, indem das System durch Änderungen der Masse oder Steifigkeit verstimmt wird bzw. weitere Dämpfungmaßnahmen integriert werden. Im folgenden sind einige Lösungsvorschläge auszugsweise abgebildet.

### 4.1 Verbesserungen am Wirkmechanismus

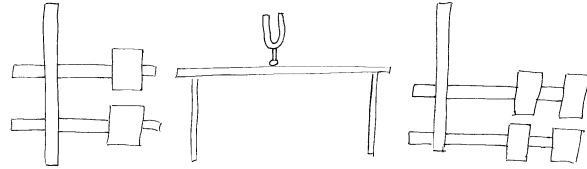


**Bild 11:** Veränderungen am Wirkmechanismus

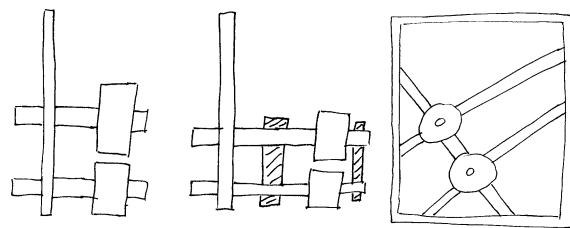
**Bild 11** zeigt Variationen der Wirkgeometrie und -Anordnung, die durch Verminderung des Einlaufvorgangs den Kraftverlauf entzerren bzw. durch Einbringen von minimaler Querbewegung bei gleicher Normalkraft den Verformungswiderstand des Vlieses reduzieren.

### 4.2 Veränderung an der Gesamteinheit

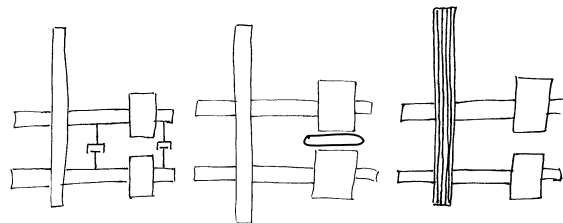
Aufgrund fertigungstechnischer Gegebenheiten und der Vorgabe eines wartungsfreundlichen Designs wurden weitere Studien zur Verbesserung des Schwingverhaltens an der Prägeeinheit vorgenommen. **Bild 12** bis **Bild 14** zeigen exemplarisch einige Lösungsmöglichkeiten auf.



**Bild 12:** Vergleich mit einer Stimmgabel; Tilger



**Bild 13:** Versteifung des Systems durch verkürzte Wellen, Zusatzelemente oder Verrippungen



**Bild 14:** Zusätzliche Dämpfung durch Reibung/viskose Dämpfer, Nutzung des Vlieses, Blechpaket als Platte

## 5 Zusammenfassung

An einer Prägeeinheit für Filterbahnen aus Vlies wurden Lärminderungsmaßnahmen durchgeführt. Dabei wurde systematisch nach ISO 11688 vorgegangen und durch Einsatz von FEM konstruktive Schwachpunkte aufgedeckt. Während eines Brainstormings wurden prinzipielle Ideen für die Verbesserung des Wirkmechanismus als auch für die Implementierung konventioneller Maßnahmen gesammelt.

## 6 Literatur

- /1/ DIN EN ISO 11688-1; Akustik - Richtlinien für die Gestaltung lärmarmen Maschinen und Geräte - Teil 1: Planung, 1998;



## Informationsveranstaltung: „Rapid Prototyping und Rapid Tooling am IMW“

Trenke, D.

*Anfang Februar fand am Institut für Maschinenwesen eine Informationsveranstaltung zum Thema Rapid Prototyping und Rapid Tooling statt, an der zahlreiche Vertreter aus Industrie und Wirtschaft als Gäste und Vortragende teilnahmen. Zudem stellte das IMW seine Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet des direkten Metall-Lasersinterns vor.*

*Early in February an information event was held at the IMW, where numerous representatives from trade and industry participated as guests and lecturers. Furthermore the IMW introduced it's research and development in the field of direct laser sintering.*

### 1 Informationsveranstaltung

Das Ziel der vom Institut für Maschinenwesen organisierten Veranstaltung war es, über die neuesten Entwicklungen und Möglichkeiten der Rapid Prototyping und Rapid Tooling Technologie zu informieren und die Forschungstätigkeiten und das Leistungsangebot des IMW darzustellen.

Hierzu berichteten am Vormittag das IMW sowie verschiedene Hersteller und Anwender von ihren Erfahrungen beim Einsatz der Rapid Tooling Technologien. Am Nachmittag fanden dann Ausführungen und Präsentationen in der Maschinenhalle des Institutes statt.

Die Informationsveranstaltung sollte dabei insbesondere die praktischen und wirtschaftlichen Vorzüge des Lasersinterns aufzeigen.

#### 1.1 Vorträge

Zu Beginn der Tagung begrüßte Prof. Dr.-Ing. N. Müller (IMW) als Gastgeber die Teilnehmer der Veranstaltung und stellte das IMW und dessen Tätigkeiten im Bereich des Rapid Prototypings und Rapid Toolings vor.

Danach informierte Herr Dipl.-Ing. H. Büse (EOS GmbH) (siehe **Bild 1**) über die Möglichkeiten zur schnellen Herstellung von Werkzeugeinsätzen durch das Rapid Tooling Verfahren des direkten Metall-Lasersinterns (DMLS, Direct Tool).

Anschließend berichtete Herr Dr. T. Hickmann (Eisenhuth GmbH KG) über Erfahrungen bei der praktischen Anwendung von Rapid Tooling Produkten im Formenbau für den Gummi- und Kunststoffspritzguss.

Zum Abschluss der Vorträge zeigte Projektmanager C. Zerle (Materialise Software) Wege zur einfachen und schnellen STL-Formgenerierung mit Hilfe des Programmes „Magics RP“ auf.



**Bild 1:** Vorträge im Hörsaal des IMW

Nach einer Mittagspause, in der sich die Teilnehmer und die Vortragenden angeregt über die einzelnen Beiträge unterhielten (siehe **Bild 2**), wurde die Informationsveranstaltung in der Maschinenhalle des IMW fortgesetzt.



**Bild 2:** Fachgespräche in der Mittagspause

## 1.2 Ausstellung

Im Rahmen der Ausstellung wurde von Seiten des IMW der Fertigungsprozess des direkten Metall-Lasersinterns auf der institutseigenen Sinteranlage EOSINT M 250 vorgestellt, sowie die komplette Rapid Tooling Verfahrenskette demonstriert.

Des Weiteren wurden die Teilnehmer über die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten und das Leistungsangebot des IMW im Bereich des Rapid Prototypings/Rapid Toolings informiert (siehe **Bild 3**).



**Bild 3:** Ausstellung in der Maschinenhalle des IMW  
Die Firma EOS (Vertreten durch Herrn Büse) stellte im Rahmen der Ausstellung ihre neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Lasersinteranlagen vor und zeigte verschiedene Sinterprodukte aus Kunststoff, Metall und Formbausand.

Der Softwareentwickler *Materialise* (Vertreten durch Frau Tielemann und Herrn Zerle) unterrichteten die Teilnehmer über das Leistungsspektrum des Rapid Prototyping und Rapid Tooling Programms „Magics RP“, welches auch vom IMW eingesetzt wird.

Das Formbauunternehmen *Eisenhuth* (Vertreten durch Herrn Dr. Hickmann) präsentierte auf seinem Stand verschiedene lasergesinterte Kavitäten und darin gefertigte Gummi- und Kunststoffspritzgussteile.

Ebenfalls zu den Ausstellern gehörte die Firma *Ingenhoven Werkzeugmaschinen* (Vertreten durch

Herrn Probst), die neben sich selbst auch den Rapid Prototyping Anlagenhersteller 3D Systems präsentierten.

Die Firma Ingenhoven war zudem bei der Organisation der Informationsveranstaltung sehr behilflich.

Das Unternehmen *Charmilles* (Vertreten durch Herrn Partosch) informierte über die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Erodieranlagen und den Einsatz von lasergesinteren Elektroden beim funkenerosiven Abtragen.

Zudem stellte sich das *Institut für Polymerwerkstoffe und Kunststofftechnik* der TU Clausthal (vertreten durch Herrn Peters) mit einem Ausstellungsstand vor.

## 2 Zusammenfassung

Die hohe Anzahl an Teilnehmern (68) an der Informationsveranstaltung hat gezeigt, dass ein großes Interesse an der Rapid Tooling und Rapid Prototyping Technologie in der Industrie und Wirtschaft vorhanden ist.

Dies bezieht sich nicht nur auf kleine und mittelständische Unternehmen, sondern auch auf größere Industriebetriebe wie z. B. die DLR, MTU, Blaupunkt und Volkswagen, die an der Veranstaltung teilgenommen haben und mit denen jetzt Kooperationen zum IMW bestehen.

Angeichts der positiven Resonanz auf die Tagung ist geplant, eine vergleichbare Veranstaltung im Jahr 2002 durchzuführen, in der über neue Fortschritte in der Rapid Tooling Technologie informiert wird und die Anwendern und Interessierten eine Möglichkeit zum Wissens- und Erfahrungsaustausch bietet.

## 3 Literatur

- /1/ Trenke, D.: Tagungsunterlagen zur Informationsveranstaltung „Rapid Prototyping und Rapid Tooling am Institut für Maschinenwesen“, IMW Clausthal 2001



## Neues Praktikum: „Rapid Prototyping und Rapid Tooling“

Trenke, D.

*Neben der Forschung- und Entwicklung kommt dem Rapid Prototyping und Rapid Tooling am Institut für Maschinenwesen auch in der Lehre eine immer größere Bedeutung zu. Da bei den Studierenden ebenfalls ein bemerkenswertes Interesse für diese zukunftsweisende Technologie vorhanden ist, wird seit diesem Jahr ein Praktikum angeboten, in dem die verschiedenen Rapid Prototyping Verfahren sowie die Rapid Prototyping Verfahrenskette vorgestellt wird.*

*Apart from research and development rapid prototyping and rapid tooling increase their significance in teaching at the IMW. Since the students also show a remarkable interest in this forward-looking technology, a practical course is offered since this year in which the different rapid prototyping methods and the rapid prototyping process-series are presented.*

### 1 Praktikumsinhalt

Das erstmals im Frühjahr 2001 durchgeführte Praktikum wird als Blockveranstaltung angeboten und gibt einen Gesamtüberblick über die verschiedenen Rapid Prototyping Methoden und Verfahren sowie über die Rapid Prototyping Verfahrenskette. Hierbei wird neben der Vermittlung der theoretischen Grundlagen besonderen Wert auf die aktive und praktische Mitarbeit der Teilnehmer gelegt.

#### 1.1 Erster Praktikumstag

Am ersten Praktikumstag wird zunächst erläutert, was prinzipiell unter den Begriffen „Rapid Prototyping“, „Rapid Tooling“ und „Rapid Manufacturing“ zu verstehen ist und welche Anwendungsgebiete und Einsatzmöglichkeiten für diese Technologien bestehen. Danach werden verschiedene Rapid Tooling Verfahren vorgestellt und die Gemeinsamkeiten bzw. ihre speziellen Vor- und Nachteile herausgearbeitet. Zu den vorgestellten Methoden gehören z. B. die Stereolithographie (STL), das Selective Laser Sintering (SLS), das Fused Deposition Modelling (FDM) und das Layer Objekt Manufacturing (LOM). Da das Institut für Maschinenwesen über eine eigene Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250 der Firma EOS (siehe **Bild 1**) verfügt, wird ins-

besondere auf diese Anlage und den darauf ablaufenden Prozess des direkten Metall-Lasersinterns (DMLS) zur Herstellung von metallischen Prototypen, Einsatzteilen und Werkzeugen (z. B. Formen) eingegangen.



**Bild 1:** EOSINT M 250

Im nächsten Praktikumsabschnitt werden spezielle Konstruktionsregeln für eine Rapid Tooling gerechte Gestaltung der zu sinternden Bauteile vermittelt. Diese Gestaltungsregeln sind erforderlich, um die Vorteile des generierenden, schichtweisen Aufbaus der Werkstücke durch das Lasersintern in seiner Gesamtheit ausnutzen zu können und die Stärken und Schwächen der einzelnen Verfahren zu berücksichtigen.

Zum Abschluss des ersten Praktikumstages wird auf die erforderlichen Leistungsmerkmale der für eine Rapid Tooling gerechten Konstruktion geeigneten CAD-Programme eingegangen und die in der Verfahrenskette benötigten Dateiformate (Schnittstellen) erläutert.

#### 1.2 Zweiter Praktikumstag

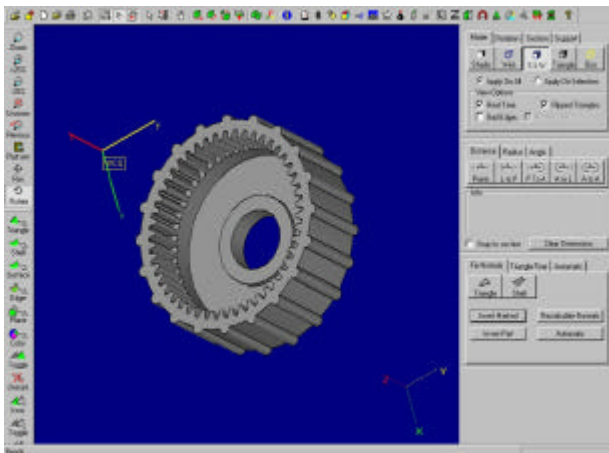
Der zweite Praktikumstag steht ganz im Zeichen der Datenaufbereitung von CAD-Konstruktionen für den Sinterprozess. Hierzu stehen 7 Rechner mit der Rapid Tooling Software „Magics“ der Firma Materialise zur Verfügung.

Mit diesen Programm lernen und üben die Studierenden:

- die Visualisierung von STL-Dateien,

- das Plazieren auf der Bauplattform,
- das Vermessen von STL-Dateien,
- das Erzeugen von Formen und Kernen,
- den Aufbau von 3D-Kühlkanälen,
- die Manipulation von STL-Dateien,
- das Generieren von Stützstrukturen,
- die STL-Datenreparatur und
- das Editieren von STL-Dateien.

Am Ende dieses Praktikumstages sind die Teilnehmer in der Lage, beliebige CAD-Konstruktionen selbständig für den Rapid Tooling Bauprozess aufzubereiten. **Bild 2** zeigt ein von den Praktikumssteilnehmern erzeugtes und für das Lasersintern aufbereitetes Bauteil.



**Bild 2:** CAD-Datensatz eines Zahnrades

### 1.3 Dritter Praktikumstag

Zu Beginn des dritten Praktikumstages werden die am Vortag erzeugten STL-Dateien in die für den Rapid Tooling Bauprozess benötigten Schichtinformationen zerlegt und an die Rapid Tooling Anlage übertragen.

Als nächstes ordnen die Teilnehmer diesen Schichtinformationen die verschiedenen Belichtungsparameter zu und entscheiden sich in Abhängigkeit von der gewünschten Bauteilqualität und Bauzeit für eine geeignete Sinterstrategie.

Wurde so der Bauprozess von Seiten der Software vorbereitet, wird nun die Rapid Tooling Anlage eingerichtet. Hierzu gehört:

- das Einsetzen und Ausrichten der Bauplattform,
- das Annähern der Bauplattform an den Abstreifer,
- das Verdichten des Metallpulvers und
- das Auftragen der ersten Pulverschicht.

Am Ende der im Praktikum vorgestellten Verfahrenskette entnehmen die Teilnehmer die gesinter-ten Bauteile und „finishen“ diese.

Dies umfasst das Entfernen der Supportstrukturen, die Infiltration der Werkstücke mit Epoxidharz und das abschließende Sandstrahlen.

In **Bild 3** ist ein während des Praktikums von den Studierenden gesinter-tes Bauteil dargestellt:



**Bild 3:** Lasergesinter-tes Zahnrad

## 2 Zusammenfassung

Wie die Teilnehmerzahlen (45) und die Anmeldungen (19) für das Praktikum im Wintersemester 2001/2002 zeigen, wird auch von Seiten der Studenten/innen die Bedeutung der Rapid Tooling Technologie für die Zukunft erkannt. Für das große Interesse an diesem Thema spricht auch die hohe Anzahl von Studien- und Diplomarbeiten (14), die innerhalb von einem Jahr begonnen bzw. abgeschlossen wurden. Zwar kann das Praktikum nicht alle Möglichkeiten und Techniken des Rapid Prototypings vermitteln, die Teilnehmer bekommen aber einen Einblick in die verschiedenen Probleme und Chancen die das neue Fertigungsverfahren des schichtweisen Lasersinterns bietet.

Aufgrund der hohen Bedeutung der Rapid Prototyping und Rapid Tooling Technologie für Fertigungsunternehmen jeglicher Art finden zur Zeit Vorbereitungen statt, das Praktikum auch als Seminar für Vertreter aus Industrie- und Wirtschaft anzubieten.

## 3 Literatur

- /1/ Trenke, D.: Praktikumsskript „Rapid Prototyping und Rapid Tooling“, IMW Clausthal 2001
- /2/ Materialise GmbH: Trainingsunterlagen „Magics 6.3“, München 2001

## Ausstellung auf der Hannovermesse Industrie im April 2001

Birkholz, H.; Düsing, C.

*Vom 23.-28. April 2001 war das Institut für Maschinenwesen auf zwei Gemeinschaftsständen auf der Hannovermesse Industrie vertreten. Im Folgenden soll über (auch nicht ganz ernst gemeinte) Erfahrungen berichtet werden.*

*The Institute of Mechanical Engineering took part at the Hanover Trade Fair from April, 23. to 28. 2001. The article reports on the experiences made during this week.*

### 1 Nds. Gemeinschaftsstand - Innovationsland Niedersachsen

Auf dem Gemeinschaftsstand Innovationsland Niedersachsen war das Institut für Maschinenwesen mit dem Exponat "Welle-Nabe-Verbindungen, leistungsgesteigert und verschleißreduziert" vertreten. Um einen Blickfang bieten zu können, wurde der Verspannkasten für statische Torsion auf Hochglanz poliert und mit dem institutseigenen PKW-Anhänger am Aufbau- und Montagetag zur Messe transportiert. Das Aufladen gestaltete sich mit Hilfe der Rampe hinter dem Institut sehr einfach, es wurde jedoch "vergessen", dem Aufbauteam mitzuteilen, dass ein Herunterheben des Kastens mindestens 4 Personen erfordert. Dies führte folglich auf dem Messegelände zu einigen Irritationen, da nur drei anwesend waren. Zusätzlich wurde auf dem Stand ein Teil des Bruchmuseums ausgestellt, eine PowerPoint-Präsentation lieferte Anschauungsmaterial zu Simulationen und Institutsleben.

Vorgestellt wurden die Forschungsfelder Zahnwellen-Verbindung, Innenhochdruckfügen und spielbehaftete Längsstiftverbindungen.

Es gab viele ausführliche fachliche Gespräche mit Messebesuchern, die von den zerstörten Ausstellungsstücken angelockt wurden. Hierbei wurde die Notwendigkeit eines "Eye-Catchers" sehr deutlich. Es kamen zusätzlich auch viele Besucher gezielt an den Stand, sei es, weil sie in Clausthal studiert hatten oder weil bereits früher einmal eine Zusammenarbeit ihrer Firma mit dem Institut erfolgte. Bei ersteren stellte sich heraus, dass sich die Probleme der Studenten in den 60-er Jahren betreffs des Uni-Standortes Clausthal von den heutigen nur marginal unterschieden. Unangefochten lag auch damals

auf Platz 1 das durchwachsene Wetter, dicht gefolgt vom zu geringen Frauenanteil.

Es ließ sich jedoch auch ein breit gefächertes Interesse am Forschungsangebot des Institutes feststellen. Hierbei konnten die Standbetreuer im direkten Gespräch Vorgehensweisen sowie Prüfstands-ausstattungen und gesammelte Erfahrungen darlegen. Diese schlugen sich in etlichen Kooperationen nieder. Eine weitere gute Werbung für das Institut waren die im Vorfeld der Hannovermesse verteilten Flyer, die ebenfalls Anfragen zur Zusammenarbeit zur Folge hatten.

Pro Tag waren zwei Mitarbeiter am Stand vertreten. Dies erwies sich als untere Grenze, auf Grund des (so stark auch nicht erwarteten) Interesses waren Pausen zur Nahrungsaufnahme rar.

Dies konnte jedoch nachgeholt werden. Aufreibend waren abendliche Standparties, die vor allem bei Eröffnung des Buffets den Verdacht aufkommen ließen, dass ein Engpass bei der Versorgung mit Grundnahrungsmitteln kurz bevor steht. Schwierig war die Entscheidung, bei welchem Aussteller man das Buffet schädigen sollte. Hier erwies sich jedoch die Anwendung modernster Telekommunikationstechnologie als vorteilhaft: "Komm' mal zum Sachsenstand, die haben eine hervorragende Gulaschsuppe." Weiterhin kann man nur hoffen, dass bei Volkswagen kein direkter Zusammenhang zwischen den Fähigkeiten Bierzapfen und Autobauen besteht.

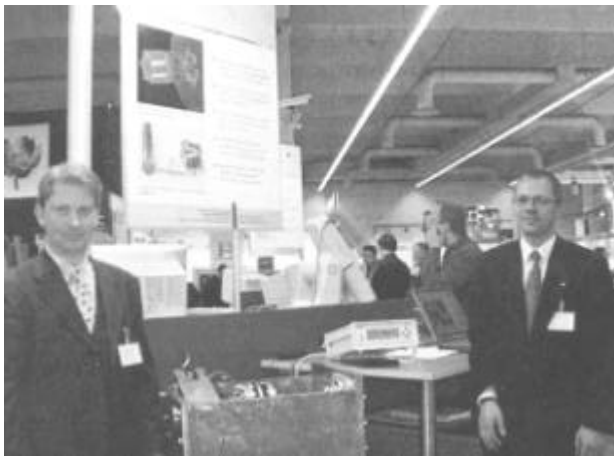
Einziger Nachteil war der Abbau- und Montagetag; da es erst ab 21.00 Uhr möglich war, mit einem LKW das Gelände zu befahren, und man mit dieser Idee auch nicht allein dastand, kam es zu erheblichen Verzögerungen. So konnte der Abschluss der Messewoche erst gegen 2 Uhr morgens getätigt werden.

### 2 Gemeinschaftsstand des Berliner Kreises

Das Institut für Maschinenwesen war auch am Gemeinschaftsstand des Berliner Kreis - Wissenschaftliches Forum für Produktentwicklung e.V. vertreten. Der Berliner Kreis verfolgt das Ziel, Forschung und Lehre stärker auf die sich deutlich abzeichnenden Herausforderungen an die Industrie abzustimmen und die Unternehmen bei der Ent-

wicklung der Produkte für die Märkte von morgen zu unterstützen /1/.

Auf diesem Stand hat das Institut für Maschinenwesen Ergebnisse und Untersuchungen aus den Bereichen Produktentwicklung, Entwicklungsmethodik und Informationstechnik in Produktentwicklungsprozessen vorgestellt. Hierzu gehörten vor allem die Projekte SEDRES2 (Systems Engineering Data Representation and Exchange Standardisation -2) /2/, KARE (Knowledge Acquisition and Sharing for Requirements Engineering) /3/, SIMNET (Workflow Management for Simultaneous Engineering Networks) /4/ sowie ein Projekt zum Konstruieren lärmarmen Produkte /5/.



**Bild 1:** Stand des IMW auf der Hannover Messe 2001

Durch „Eye Catcher“ wie zum Beispiel einen neuen mechatronischen Roboter oder aber auch durch das charmante Standpersonal (siehe hierzu auch **Bild 1**) wurden viele Besucher an den Gemeinschaftsstand gelockt. Mit diesen Gästen wurden viele kurzweilige Gespräche geführt, die jedoch weniger in die fachliche Tiefe führten als vielmehr in eine allgemeine wissenschaftliche Unterhaltung über den Stand der Technik übergangen.

Es kamen jedoch auch hier viele Besucher gezielt an den Stand, sei es auf Grund von langjährigen Kontakten mit dem Institut oder aber auch geladene Gäste, die eine Kooperation mit dem IMW im Bereich der Forschung anstreben. Hierbei kam es dann teilweise zu deutlich intensiveren Gesprächen, welche sich zum Teil über einige Stunden hinzogen und aus denen auch schon erste positive Kooperationen gewachsen sind. Dank des guten Catering-service am Stand des Berliner Kreises waren dann auch diese ausdauernden Diskussionen in angenehmer Atmosphäre und mit genügend Kaffeenachschub durchzustehen. Die Betreuung

des Standes des IMW war mit durchgehend ein bis zwei Mitarbeitern ausreichend, wenn auch zu Hauptzeiten der Andrang mal sehr groß werden konnte.

Die Mühen des Tages wurden abends wieder schnell vergessen auf den unterschiedlichsten Standpartys der Aussteller. Dort hatte man dann auch die Gelegenheit sich mit den Kollegen zu unterhalten, die tagsüber zwar nur einhundert Meter entfernt aber genauso ausgelastet waren.

### 3 Zusammenfassung

Die Erlebnisse und Erfahrungen der Ausstellungswoche auf der Hannovermesse lassen sich kurz zusammenfassen: Auch wenn das allgemeine Interesse meist sehr groß ist, so kommt es jedoch am meisten bei geladenen und bekannten Besuchern zu weiterführenden und tieferen Diskussionen. Hieraus sind schon einige Kooperationen entstanden, die sicherlich auch in Zukunft weiter ausgebaut werden.

### 4 Literatur

/1/ <http://www.berliner-kreis.de>, 2001

/2/ <http://www.sedres.com>, 2001

/3/ <http://www.kare.org>, 2001

/4/ <http://www.imw.tu-clausthal.de/simnet/>, 2001

/5/ Dietz, P.; Gummersbach, F.: Lärmarm konstruieren XVIII - Systematische Zusammenstellung maschinenakustischer Konstruktionsbeispiele, Bremerhaven, Wirtschaftsverlag NW Verlag für neue Wissenschaft, 2001



# Erfahrungen zum neuen Maschinenlaborversuch

## Welle-Nabe-Verbindungen

Birkholz, H.

*Während des Hauptstudiums müssen alle Studenten der Fachrichtung Maschinenbau im Rahmen des so genannten Maschinenlabors an insgesamt 10 Versuchen teilnehmen, die, um eine große Bandbreite abzudecken, an verschiedenen Instituten durchgeführt werden. Nach langen Jahren wurde zum Wintersemester 1999/2000 am Institut für Maschinenwesen ein neuer Versuch angeboten. Im folgenden soll über die Erfahrungen mit den ersten Teilnehmergruppen berichtet werden.*

*During advanced study period all students of mechanical engineering have to attend the so called Maschinenlabor. It includes 10 different experiments. One new created is under supervision of the Institute of Mechanical Engineering. This article describes the new experiment and the first experiences for both students and institute.*

### 1 Einleitung

Das Institut für Maschinenwesen bot im Rahmen des Maschinenlabors bis zum Jahr 2000 den Versuch "Druckmessung an einem Hubkolbenverdichter" an. Evaluierungen der Lehre an der TU Clausthal ergaben, dass die Studenten die archaische Ausstattung des Versuches als nicht zeitgemäß empfanden. Dies wirkte sich auch stark auf die Motivation und Aufmerksamkeit der Gruppe während des Versuches aus.

Aus diesen Gründen entstand die Überlegung, einen neuen Versuch zu kreieren, der auch das Kernforschungsgebiet des Institutes, die Welle-Nabe-Verbindungen in einigen ihrer verschiedenen Spielarten, berücksichtigt.

#### 1.1 Versuch und Versuchsdurchführung

Zur Untersuchung kommen je Gruppe eine Längsstift- oder Passfederverbindung sowie ein Kegelpressverband. Längsstift- und Passfederverbindung unterscheiden sich zusätzlich noch durch den Nabenaußendurchmesser, so dass sich vier verschiedene Varianten ergeben. Die Verbindungen werden in den auf der Koordinatenmessmaschine platzier-

ten Verspannkasten /1/ eingesetzt. Vor Versuchbeginn erfolgt eine kurze Abfrage des Versuchsinhaltes aus dem Versuchsumdruck. Anschließend wird vom Betreuer kurz der Versuchsaufbau erläutert. Vor der ersten Lastaufgabe erfolgt ein Rundheits-scan der Nabenoberfläche zur Ermittlung der unbelasteten Kontur (**Bild 1**). Danach werden für jede Laststufe von 0 bis 500 Nm in 100-er Schritten die Verformungen der Nabenoberfläche innerhalb eines Winkels von 180° gescannt.

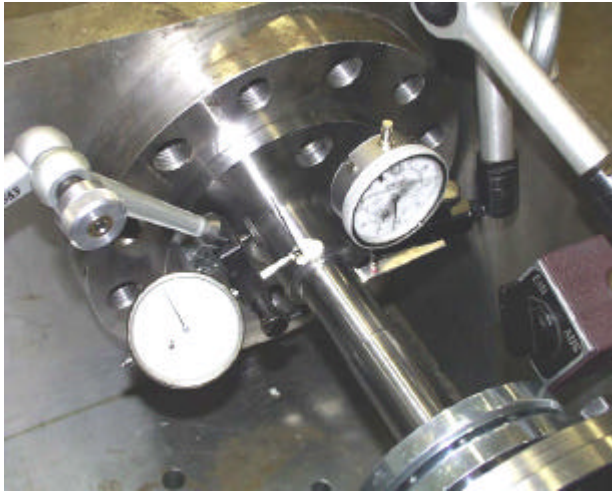


**Bild 1:** Versuchsaufbau zum Teil 1: Deformationsverhalten von Welle-Nabe-Verbindungen

Die Messschriebe werden ausgedruckt und der Gruppe zur Auswertung übergeben. Jede Gruppe erhält dabei die Messschriebe ihres eigenen Versuches sowie die Kopien der anderen, im Voraus durchgeführten Versuche.

Zum zweiten Versuchsteil wird zur Ermittlung des Durchrutschmomentes eines Kegelpressverbandes der Verspannkasten auf den Boden gesetzt und ein Kegelpressverband eingebaut. Zusätzlich werden auf der Welle sowie der Nabe Messungen zur Antastung der Messuhren aufgeklebt (**Bild 2**).

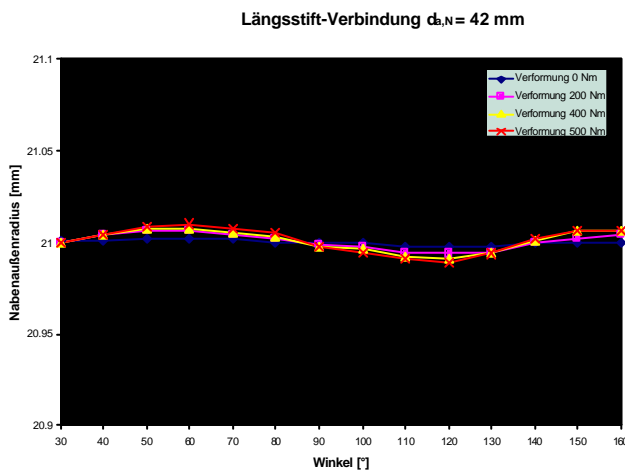
Bei diesem Versuchsteil erfolgt die Lastaufgabe in 50 Nm-Schritten, um den genauen Zeitpunkt des Durchrutschens ermitteln zu können. Die Werte der Messuhren werden von den Studenten zusammen mit den jeweiligen, zugehörigen Lastwerten aufgenommen.



**Bild 2:** Versuchsanordnung zum Teil 2: Durchrutschmoment eines Kegelpressverbandes

## 1.2 Versuchsauswertung und Protokoll

Das Protokoll soll die bekannten Punkte Versuchsaufbau, -Durchführung und -auswertung sowie Diskussion und Einordnung der Ergebnisse enthalten. Die Versuchsauswertung erfolgt mit Hilfe der Ausdrücke der Koordinatenmessmaschine. Es sollen für die einzelnen Verbindungen, unterschieden nach Art und Nabenaußendurchmesser, Diagramme erstellt und bewertet werden. Ein Beispiel zeigt **Bild 3**.



**Bild 3:** Verformung der Nabenaußenkontur bei verschiedenen Laststufen

Für den Versuchsteil 2 ist der im Versuch eingesetzte Kegelpressverband theoretisch zu berechnen. Zusätzlich ist zu der getesteten Verbindung das Drehmoment-Verformungs-Diagramm zu entwickeln und der theoretische mit dem experimentell ermittelten Wert zu vergleichen.

Abschließend ist eine kritische Einordnung der Ergebnisse mit einer Fehlerdiskussion zu verbinden.

## 2 Erfahrungen am Institut

Der Maschinenlaborversuch Welle-Nabe-Verbindungen wurde bisher in den Wintersemestern 1999 und 2000 durchgeführt. Im Vergleich zum alten Versuch fiel auf, dass das Interesse deutlich gesteigert werden konnte. Dies ist an der bis auf wenige Ausnahmen guten bis sehr guten Vorbereitung festzustellen. Weiterhin ist ein deutliches "bei der Sache sein" u.a. darauf zurückzuführen, dass die Studenten im Grunde eigenhändig (bis auf die Bedienung der Koordinatenmessmaschine) den Versuch durchführen. Zusätzlich kommen wesentlich modernere Messgeräte zum Einsatz, auch liegt das Thema laut Aussage der Studierenden näher am klassischen Maschinenbau.

Ferner bot sich die Vorführung des Versuches in abgespeckter Form für das von der Universität im Frühjahr durchgeführte Schülerseminar sowie (zur Freude der den Versuch begleitenden Hiwis C. Becker und C. Ring) für die Schnupperstudentinnen an. Beide Veranstaltungen kamen bei den Schülern und Schülerinnen sehr gut an, so dass es in diesem Herbst zu einer Wiederholung kam.

Als einziges Manko bei der Versuchsvorbereitung und -durchführung hat sich das Gewicht des eingesetzten Verspannkastens erwiesen. Dieser ist nur mit Hilfe eines Gabelstaplers auf die Messmaschine zu heben, was sich im Hinblick auf die Enge des Messraumes als schwierig gestaltet, pro Versuch aber auf Grund der Umbauten zweimal notwendig ist.

Abschließend kann jedoch gesagt werden, dass die Vorteile des neuen Versuches gerade mit Sicht auf die Ausbildung der Studenten die Nachteile deutlich überwiegen.

## 3 Literatur

- /1/ Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1). Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1998

## Modularisiertes internationales Ingenieurstudium

Wächter, M.

*Eine effektive Gestaltung von Studien- und Weiterbildungsprozessen an Hochschulen ist durch ein modularisiertes Bildungsangebot möglich. An der TU Clausthal werden aus einzelnen Mosaiksteinchen internationale Studienverläufe realisiert.*

*Modularised Education offers can be used für effective Design of study- and training-processes at university level. The Clausthal University of Technology realises international studies through the application of educational modes like a mosaic.*

### 4.21 Einleitung

Die Globalisierung führt zu Veränderungen in der Beschäftigungswelt und nimmt somit unmittelbaren Einfluß auf die Bildungs- und Ausbildungssituation an den Hochschulen. In einem länderübergreifenden Verbundprojekt aus acht Hochschulen hat sich die TU Clausthal mit der Fragestellung der Internationalisierung der studentischen Ingenieurausbildung beschäftigt. Die Ausbildung an deutschen Hochschulen muss offen und transparent sein für ein internationales Publikum und daneben dem Wettbewerb auf dem globalen Bildungsmarkt standhalten. Dieser Forderung gerecht zu werden heißt, Möglichkeiten für deutsche Studierende zu schaffen ein Teil- oder Vollstudium ohne Studienverlängerung im Ausland absolvieren zu können bzw. ausländischen Studierenden ein entsprechendes Studium an deutschen Hochschulen zu ermöglichen.

### 4.22 Internationales Ingenieurstudium

Ein Vergleich des internationalen Ingenieurstudiums zeigt, dass es kein einheitliches System für Bachelor-, Master- und Diplomabschlüsse gibt, sondern eine Vielfalt von Einzellösungen. Ein Grund für die Verschiedenartigkeit der Studiensysteme liegt in den unterschiedlichen Schulsystemen begründet, durch die das Studieneinstiegs- und Studienabschlussalter stark variiert. Es werden Bachelorabschlüsse nach drei oder vier Jahren, mit oder ohne praktische Ausbildungsinhalte angebo-

ten, dabei zeigt ein Vergleich, dass der Aufwand für Lehrveranstaltungen für einen Bachelorabschluss zwischen 900 und 4000 Stunden variiert /1/. Gegenwärtig gibt es für einen Bachelorabsolventen keinen definierten Zugang zu Diplomstudiengängen an deutschen Hochschulen. Die inhaltliche Nichtkompatibilität der Studienmodelle Bachelor/Master und Diplom bereitet bei einem Wechsel in ein anderes System Probleme. Das Bachelor-Studium ist meist auf das Qualifikationsniveau eines ersten berufsbefähigenden Abschlusses unterhalb des Masters ausgerichtet. Der ausländische Bewerber mit dem Bachelor-Grad weist im allgemeinen Defizite im Bereich der vertieften mathematisch-naturwissenschaftlichen und technischen Grundlagen auf, die in einem universitären Diplomstudiengang im Grundstudium vermittelt werden.

Studieninhalte und Studienabschlüsse im Studiengang Maschinenbau wurden beispielhaft an einigen ausländischen Kooperationshochschulen der TU Clausthal analysiert. Es zeigte sich, dass der erste berufsqualifizierende Abschluss nach sechs Semestern an der University Cardiff, nach acht Semestern an der Universität Krakau, nach neun Semestern an der Montanuniversität Leoben und nach dreizehn Semestern an der Universidad de Oviedo vergeben wurde, dabei schwankt der zeitliche Aufwand für Lehrveranstaltungen zwischen 96 Semesterwochenstunden (SWS) und 339 SWS.

Das modularisierte Studium soll die Mobilität der Studierenden fördern, für eine Anerkennung von Studienleistungen ist die Einführung eines Kredit- und Leistungspunktesystems unumgänglich.

International gibt es drei bedeutende Kredit- und Leistungspunktesysteme:

- Kreditakkumulierungssystem  
(Amerikanisches System)
- Kreditmischsystem CATS  
(Britisches System)
- Kredittransfersystem ECTS  
(Europäisches System)

Das Amerikanische System ist ein reines Sammelsystem von Leistungspunkten. In einem Semester sind 15 credits zu erarbeiten, diese verfallen auch



bei Unterbrechung oder Wandlung in ein Teilzeitstudium nicht. Ein Notendurchschnitt entscheidet über die Fortsetzungsmöglichkeit des Studiums. Ein Hochschulwechsel ist aufgrund der Hochschulkonzeption sehr schwierig.

Das Credit Accumulation and Transfer Systems (CATS) ist als Sammel- und Transfersystem gedacht. Für einen Bachelorabschluss müssen jeweils 120 credits aus den Leistungsstufen 1, 2 und 3 nachgewiesen werden, wobei in einem Studienjahr in der Regel 120 credits zu erarbeiten sind. In Gesprächen zeigte sich, dass die Transfermöglichkeit im Studium eingeschränkt wird. Grund dafür ist die regelmäßige Evaluation der Hochschulen, von deren Ergebnis die finanzielle Zuwendung abhängt.

Das European Credit and Transfer System (ECTS) ist das jüngste Kreditsystem und wird als Transfersystem definiert. Gegenwärtig ist die Teilnahme am Kredittransfersystem freiwillig ohne einen Eingriff in die Autonomie der Hochschulen. In einem Studienjahr können 60 credits gesammelt werden.

Eine Betrachtung der unterschiedlichen Kreditsysteme zeigte, dass die Wertigkeit für einen Kreditpunkt international stark schwankt. Die Arbeitsleistung eines Semesters mit 15 Semesterwochen und einem Lehrplan mit 25 SWS Lehrveranstaltungen ermöglicht den Erwerb von 15 bis 50 credits je nach Kreditsystem und Hochschulland. Zukünftig muss ein Kredit- und Leistungspunktesystem zum Einsatz kommen, das einen wahren Vergleich der studentischen Arbeitsbelastung ermöglicht und gegebenenfalls einen Umrechnungsfaktor zu anderen Leistungspunktesystemen festlegt.

### **4.33 Konzepte für modularisierte internationale Studienmodelle**

Ein Auslandsaufenthalt während des Studiums im Bereich der ingenieurwissenschaftlichen Studiengänge zeichnet sich aufgrund der zunehmenden Globalisierung als unerlässlicher Bestandteil der Ausbildung ab, sei es zur Vertiefung von Sprachkenntnissen oder zur Förderung des Denkens in internationalen Bezügen /2/. Die Modularisierung von Studiengängen schafft hierfür eine wichtige Voraussetzung. Für jeden Hochschulwechsler ist ein persönlicher Studien- und Prüfungsplan innerhalb eines modularisierten Studiums unumgänglich. Dieser soll durch Genehmigung der Heimathochschule eine unerlässliche Planungssicherheit für den Studierenden darstellen und dafür Sorge tra-

gen, dass die Lehrveranstaltungen einen Wissenszuwachs in den verschiedenen, geforderten Kompetenzfeldern gewährleisten. Für das Maschinenbaustudium wird von einer Aufteilung der zu erwerbenden Kompetenzen von 60 % Fachkompetenz, 15 % Methodenkompetenz, 10 % Systemkompetenz und 15 % Sozialkompetenz und übergreifenden Qualifikationen ausgegangen. In diesem Zusammenhang wird auf die Notwendigkeit der öffentlichen Beschreibung der einzelnen Module hingewiesen.

#### **4.3.13.1 Vollstudium**

Ein Vollstudium Maschinenbau erstreckt sich in der Bundesrepublik Deutschland gegenwärtig über 7 bis 10 Semester. Für die TU Clausthal ist beispielhaft ein modularisiertes Studienmodell erarbeitet, dessen Studiendauer nicht mehr über Semester sondern über Kreditpunkte (ECTS) definiert ist. Der Diplomingenieur Maschinenbau wird bei einem Nachweis von 310 Kreditpunkten vergeben, diese gliedern sich in

- 120 Kreditpunkte für Grundlagenausbildung
- 45 Kreditpunkte für vertiefende Pflichtmodule
- 48 Kreditpunkte für vertiefende Wahlmodule
- 27 Kreditpunkte Studien-/Projektarbeiten
- 30 Kreditpunkte für Diplomarbeit
- 40 Kreditpunkte für Industriepraktikum

Kernpunkte dieses Studienprogrammes sind die semesterbegleitenden Prüfungen der Module sowie die Nutzung der vorlesungsfreien Zeit für die Ableistung von Modulen in Lehrveranstaltungsform oder Industriepraktikum. In das Studium integriert ist ein mindestens dreimonatiger Auslandsaufenthalt. In einem Kalenderjahr beträgt die modulfreie Zeit sechs Wochen. Die Lehrinhalte entsprechen denen des „normalen“ Maschinenbaustudiums statt Blockprüfungen in festgelegten Prüfungszeiträumen werden nun Semesterabschlussprüfungen durchgeführt. Dabei ist der Forderung nach Ausbildung in den geforderten Kompetenzbereichen Rechnung getragen.

#### **4.3.23.2 Ein- bis zweisemestriges Teilstudium**

Das modularisierte Teilstudium lehnt sich an die Vorgehensweise des Studentenaustausches im Rahmen des ERASMUS/SOKRATES-PROGRAMMES an. Jeder Studierende erarbeitet sich ein Studienprogramm für den Aufenthalt an der ausländi-

schen Hochschule. Dieses Studienprogramm ist von der Heimathochschule zu genehmigen und wird Kraft dieser Genehmigung auch für den angestrebten Abschluss anerkannt. Die ausgesuchten Module können einer Vertiefung in einer Thematik oder aber einer Erweiterung der bisherigen Ausbildungsinhalte dienen. Für diese Form des modularisierten Studiums ist die Beschreibung der Module nach Inhalt und Ziel unerlässlich. Es muss ausgeschlossen werden, dass ein Studierender ein Modul mit identischem Lerninhalt sowohl an der Heimathochschule als an der Gasthochschule belegt und zur Anrechnung für den gewünschten Studienabschluss einreicht. Grundsätzlich gilt, dass die Hochschule für die Verifizierung der Studienpläne verantwortlich ist, die auch den Grad vergibt – dies ist bei diesem Modell im allgemeinen die Heimathochschule.

#### **4.3.33.3 Graduiertenstudium**

Ein Graduiertenstudium stellt ein Weiterbildungsstudium im Anschluss an einen ersten berufsqualifizierenden Abschluss dar, es kann mit dem Master-, Diplom- oder Dokortitel abschließen. Für den Studiengang Maschinenbau wird ein Graduierten/Postgraduate Studium mit dem Diplomabschluss betrachtet. Der Abschluss Diplomingenieur kann nach Erreichen von 310 Kreditpunkten vergeben werden. Wer als Vorleistung für die Aufnahme des Graduiertenstudiums einen dreijährigen Bachelorabschluss einbringt, kann 180 Kreditpunkte angerechnet bekommen. Der Studierende muss zum Erwerb des Diplomabschlusses noch 130 Kreditpunkte aus dem Bereich der vertiefenden Lehrveranstaltungen, der Diplomarbeit und des Industriepraktikums sammeln. Die Ausbildungsschwerpunkte nach den Kompetenzfeldern sollten dabei Berücksichtigung finden, die Einführung des Diploma Supplements führt zu einer Erleichterung bei der Beurteilung der bisher erworbenen Kompetenzen. Beispielhaft ist dieses Konzept für einen Absolventen mit Bachelorabschluss der University of Wales in Cardiff ausgearbeitet /2/.

Rahmenbedingungen für eine Gleichwertigkeitserklärung zu einem Bachelorabschluss innerhalb eines einstufigen Studienganges sind für die Aufnahme eines Graduiertenstudiums im Ausland eine wichtige Voraussetzung, derzeit fehlt Studierenden im Diplomstudiengang diese Schnittstelle für die Aufnahme dieser Studienform ohne zeitlichen Verlust.

#### **4.3.43.4 Binationale Studiengänge mit Doppel-diplomabschluss**

Die binationalen Studiengänge mit Doppeldiplomabschluss, bekannt auch als deutsch-ausländische Studiengänge, machen ein Studium an mindestens zwei Hochschulen erforderlich, in dem die Anforderungen beider Hochschulabschlüsse erfüllt werden müssen. An der TU Clausthal werden gegenwärtig im Studiengang Maschinenbau zwei binationale Studiengänge kreiert, zum einen mit der University of Wales in Cardiff als Master/Diplomabschluss und zum anderen mit der Universität Krakau als Diplom/Diplomabschluss.

In Cardiff kann nach einem erfolgreichen vierjährigen Studium der Masterabschluss vergeben werden, der Diplomabschluss an der Technischen Universität Clausthal erst nach viereinhalbjährigem Studium. Somit wird der Doppelabschluss erst nach der längeren Studiendauer möglich. Die zu erarbeitenden Kreditpunkte sind mit 310 festgelegt. Die Studierenden müssen neben Lehrveranstaltungen an der Heimathochschule ausgewählte Lehrveranstaltungen an der ausländischen Hochschule belegen, dabei sind im Ausland Module über mindestens 60 Kreditpunkte nachzuweisen. Der Studienablauf für einen Studierenden aus Cardiff beginnt mit einem viersemestrigen Studium im Masterstudiengang "Mechanical Engineering" an der Heimathochschule, anschließend besucht der Studierende für ein Jahr die TU Clausthal und nimmt an den Lehrveranstaltungen im Studiengang Maschinenbau teil, besucht Deutschkurse und fertigt eine Studienarbeit an. Für das vierte Studienjahr geht der Studierende wieder an seine Heimathochschule und besucht dort die Lehrveranstaltungen und erarbeitet die zweite Studienarbeit. Die Diplom- bzw. Masterarbeit ist im neunten Semester zu schreiben, diese wird sowohl von einem Professor der University Cardiff als auch von einem Professor der TU Clausthal betreut und bewertet, die wissenschaftliche Lösung der Problemstellung kann dabei in Cardiff oder Clausthal erfolgen. Für den Clausthaler Studierenden ist der Studienablauf spiegelsymmetrisch, dieser besucht nach dem Vordiplom für ein Jahr Lehrveranstaltungen an der University Cardiff und fertigt die erste Studienarbeit an.

Voraussetzung für diese Studiengänge sind ausreichende Kenntnisse der jeweiligen Landessprache.

An der Universität Krakau wird der Diplomabschluss nach zehn Semestern vergeben, an der TU Clausthal nach neun Semestern, für den binatio-

nalen Abschluss wird somit ein zehensemestriges Studium erforderlich. Der Abschluss kann nach erfolgreicher Erarbeitung von 340 Kreditpunkten vergeben werden. Der Studienablauf sieht in den ersten sechs Semestern ein Studium an der Heimathochschule vor, anschließend müssen mindestens zwei Semester (entspr. 60 Kreditpunkte) an der ausländischen Hochschule absolviert werden, das neunte Semester kann sowohl an der ausländischen Kooperationshochschule als auch an der Heimathochschule besucht werden. Die Diplomarbeit ist von Professoren beider Hochschulen zu betreuen und zu bewerten, der Ort der Bearbeitung ist frei wählbar.

Der Clausthaler Diplomabschluss macht ein 26 wöchiges Industriepraktikum zwingend erforderlich, dies ist sowohl für die Cardiffer als auch für die Krakauer Teilnehmer bindend. Ein Vergleich der Ausbildungsinhalte nach Kompetenzfeldern zeigte in beiden binationalen Studiengängen unproblematische Schwankungsbreiten, die sich im Bereich der Wahlmöglichkeiten innerhalb des Studienganges bewegten.

Für die Anrechnung der einzelnen Module wird das Kredittransfersystem ECTS angewandt, dies bedeutet eine Halbierung der in Cardiff vergebenen Credits nach dem Kreditmischsystem CATS. In Krakau kommt ebenfalls das ECTS-System zur Anwendung.

Einzelheiten zu den binationalen Studiengängen mit Großbritannien und Polen sind im Abschlußbericht zum Bund-Länder-Projekt Modularisierung von Studiengängen ausführlich dargestellt /2/.

zu einem Kreditakkumulierungssystem sind zukünftig verstärkte Aufmerksamkeit zu schenken. Dies zeigt sich besonders bei dem Versuch, die Gleichwertigkeit ausländischen Lehrleistungen zu beurteilen.

#### 4.65 Literatur

- /1/ Dalichow, Fritz: Kredit- und Leistungspunktesysteme im internationalen Vergleich, BMBF 1997
- /2/ BLK-Projekt: Länderübergreifende Entwicklung und Erprobung integrierter modularer Studienangebote unter Einbeziehung informations- und kommunikationstechnischer Medien am Beispiel der Ingenieurwissenschaften, Abschlußbericht AP4 Internationalisierung, 2001

#### 4.54 Ausblick

Konzepte zu modularisierten Studienmodellen sind vorgestellt. An der TU Clausthal werden diese ab dem WS 2000/2001 durch Studierende realisiert. Jede Hochschule sollte dafür Sorge tragen, dass die Beschreibungen der Modulinhalte mit Lernzielen und Kreditpunkten allen Studieninteressierten im Internet zur Verfügung stehen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung zur Erstellung des persönlichen Studien- und Prüfungsplanes, der zukünftig als Pflichtdokument bei einem Hochschulwechsel eingeführt werden sollte, daneben würde die Existenz des Diploma Supplement eine Einstufung im Rahmen eines Graduiertenstudiums erheblich vereinfachen.

Der Bewertung des Studienaufwandes durch ein Leistungspunktesystem und der Weiterentwicklung

# Client-Management und Softwareverteilung im Netzwerk mit NetInstall

Müller, D.; Niklaus, J.

*Mit dem zunehmend komplexeren Einsatz von Rechnern und deren Einsatz in Netzwerken erhöht sich auch der administrative Aufwand für die Systembetreuer. Um eine effizientere und zeitsparende Administration zu erreichen, wurde am IMW das Software-Management Tool NetInstall eingesetzt. Die systemunabhängige Softwareverteilung überzeugte durch Bedienung, Zuverlässigkeit und Funktionsumfang. Die anvisierten Ergebnisse konnten erreicht werden, vor allem durch eine verbesserte Qualität und einfachere Wartung der Clients durch die Standard-Projektinstallationen.*

*The increasingly complex use of computers in networks results in an also increased administrative effort for the system administrators. For an efficient and time-saving administration the IMW introduced the software management tool NetInstall. The system-independent software distribution convinced with operation, reliability and functional range. The envisaged goals were reached, especially through increased quality and uncomplicated maintenance of the clients by standardised software installations.*

## 1 Einleitung

Mit der Umstellung der Rechnerstrategie am Institut für Maschinenwesen im Sommer 2000, die einen erhöhten administrativen Aufwand für die am Institut zuständigen Administratoren bedeutete, wurde nach Möglichkeiten gesucht, die operativen Aufgaben zu automatisieren und effizienter, sowie zeitsparender zu gestalten. Speziell für das komplexe Software-Management der in der Anzahl gestiegenen PCs wurde ein Werkzeug gesucht, um die Clients vom Administrator-Arbeitsplatz aus verwalten zu können und damit optimale Voraussetzungen für effektive Arbeitsabläufe zu schaffen, um sie von zeitraubenden Routineaufgaben zu entlasten.

Nach einer ausführlichen Analyse, der sich zu dem Zeitpunkt am Markt befindlichen Systeme für Software- und Client-Management, fiel die Entscheidung des IMW unter Beachtung der zu verwaltenen Rechneranzahl, Wirtschaftlichkeit und Systemunabhängigkeit auf das Softwareprodukt *NetInstall 5.0 Standard Edition* von der deutschen NetSupport GmbH.

In den folgenden Abschnitten wird ein allgemeiner Überblick über NetInstall angeboten, Einrichtung und Einsatz am IMW beschrieben und ein Resümee über die Erfahrungen aus der nun über ein Jahr währenden Anwendung gezogen.

## 2 Software-Management mit NetInstall

### 2.1 Grundlagen

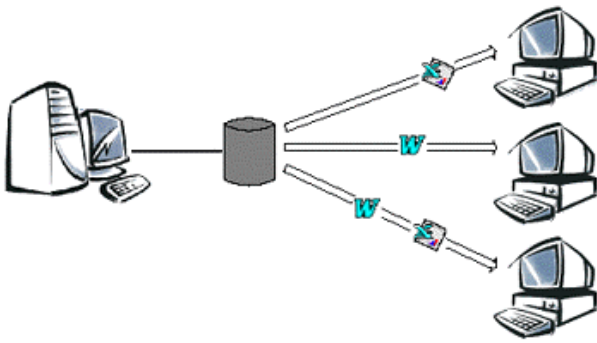
Die Funktionalität von NetInstall geht weit über die von herkömmlichen Softwaredistributionsprodukten hinaus. Deshalb kann man es auch eher als ein Programm zum Client- und Softwaremanagement bezeichnen. Sowohl Installationen als auch Deinstallationen von Programmen lassen sich automatisieren und erfolgen, je nach Bedarf, zeit-, ereignis- oder benutzergesteuert, ohne weitere manuelle Eingriffe. Die Installationen können durch Anpassung der herkömmlichen Setup-Installation auf Unternehmensbedürfnisse zugeschnitten werden. Der Zeitaufwand für Installation und Pflege von Software verringert sich deutlich.

Zu den Hauptfunktionen, die von NetInstall im Rahmen des Software-Managements unterstützt werden, zählen die Unterstützung von Betriebssysteminstallationen und das Applikations-Management, bei dem die Anwendungen netzwerkweit auf alle Clients verteilt werden, und dies bedarfsgerecht durch automatische oder individuell vom Benutzer ausgelöste Installationen. Desweiteren besteht die Möglichkeit des Customizing. Die Applikationen können mit Hilfe einer eigenen, leistungsfähigen, vollständig dialoggeführten Befehlssprache sowie zahlreiche Variablen genau an die Anforderungen für Rechner bzw. Benutzer angepasst und von zentraler Stelle aus gepflegt werden. Ermöglicht wird weiterhin ein Client-Management durch eine Vielzahl von Funktionen für die Verwaltung von Clients, wie z.B. die Installation von Schriften, Diensten, Treibern und die Vergabe und Pflege von NTFS-Dateirechten.

### 2.2 Grundkonzepte von NetInstall

Als entscheidender Vorteil von NetInstall ist die Organisation der Applikationsinstallationen über **Installationsprojekte** anzusehen. Bei herkömmlichen Setup-Programmen ist normalerweise auf-

grund von fehlenden Benutzer-Rechten die Anwesenheit eines Administrators notwendig. Zudem bereiten individuelle Installationen, die zumeist nicht ausreichend firmen- oder rechner-spezifisch angepasst sind, vermehrt Probleme durch Inkonsistenzen und fehlerhaften Konfigurationen. NetInstall ersetzt die applikationseigenen Setup-Programme durch Installationsprojekte. Für jede zu verteilende Applikation wird mit der Aufzeichnung durch den NetInstall Spy einmalig ein Projekt erstellt und in einer Projektdatenbank abgelegt. Zu einem Installationsprojekt gehören alle für die Installation einer Applikation notwendigen Daten, wie z.B. Installationspfade, Registry-Einträge und Benutzer-Richtlinien, inklusive aller zugehörigen Quelldateien. Diese Installationsprojekte können in verschiedenen Versionen gepflegt werden und sind zwischen mehreren Datenbanken verschiebbar. Das Konzept der Softwareverteilung über eine Projektdatenbank ist in **Bild 1** dargestellt.



**Bild 1:** Softwaremanagement mit NetInstall

Die Definition eines NetInstall-Projekts erfolgt in Form eines Scripts in der NetInstall eigenen **Befehlssprache**. Dieses wird normalerweise automatisch vom NetInstall Spy aufgezeichnet und kann anschließend in einem speziellen Editor bearbeitet werden oder auch einfach direkt editiert werden. Alle Befehle sind in dialogorientierter Form vorhanden. Eine zwingende Einarbeitung in die Sprachsyntax ist nicht unbedingt notwendig, aber in der Anwendung sinnvoll. Der Sprachschatz umfasst ungefähr 100 Funktionen, die für die Installation von Software angepasst sind.

Die Anpassung von Projekten ist mit **Variablen** realisierbar, die erst zur Laufzeit der Installation aufgelöst werden. Zum Angebot von in NetInstall vordefinierter Variablen gehören u.a. benutzerspezifische Daten in der Netzwerksystemumgebung, bestimmte Systempfade, Datum und Uhrzeit, sowie die Netzwerkdienste der Arbeitsstation (IP-, IPX-, MAC-Adresse). Aber auch eine beliebige Anzahl Variablen mit frei wählbarem Namen kann selbst

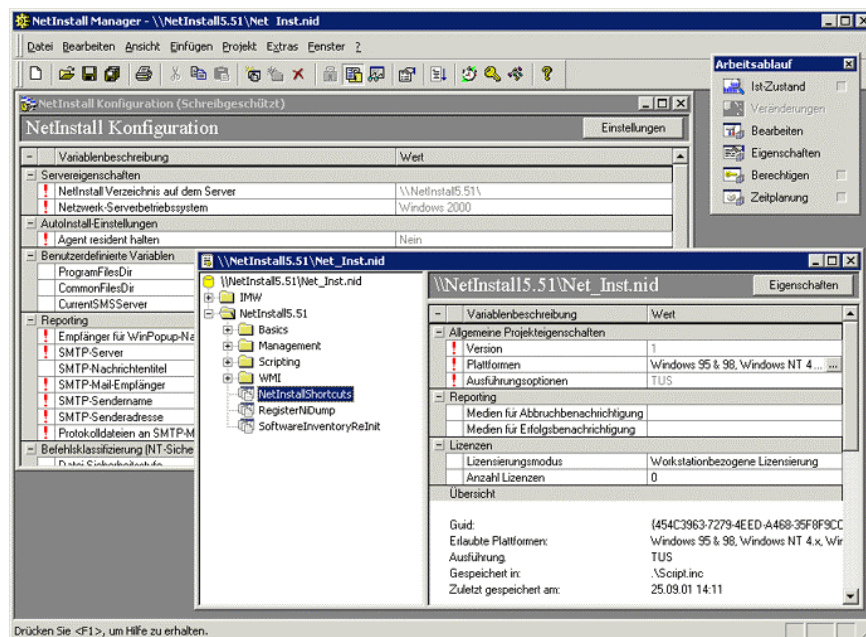
definiert werden. Zusätzlich können Werte aus INI-Dateien, ODBC-Datenbanken, der Systemumgebung und der Registry referenziert werden.

Der schon erwähnte **NetInstall Spy** ist der Programmteil, der aus dem Setup einer Software ein NetInstall Projekt erzeugt. Ein Projekt ist jedoch keine Nachbildung eines Setup-Programms, sondern besteht aus Informationen, die bei der Analyse von einem vorher aufgezeichneten Ist-Zustand und einem aktualisierten Zustand als Veränderungen registriert werden. Damit ist es möglich durch ein Projekt sowohl die Installation als auch das Customizing in einem einzigen Arbeitsschritt abzugleichen. Der NetInstall Spy kann alternativ auch zu Analysezwecken bei Systemkonfigurationen verwendet werden. Durch die Zuweisung von benutzer-, maschinen- und standortspezifischen Variablen bei der Projekterstellung wird die Transportabilität ermöglicht. Zu weiteren Merkmalen der Aufzeichnung gehört das Erkennen auch technisch anspruchsvoller Vorgänge, wie die Installation von Diensten oder Schriftarten und eine automatische Versionskontrolle auf Dateiebene. Mit der Möglichkeit einer Auswahl der zu überwachenden Verzeichnisse, sowie Bereich und Intensität der Analyse von Registry und Initialisierung können die Aufzeichnungen optimiert werden. Die Differenz-Methode von NetInstall ist somit bei der Erstellung von Installationsprojekten weit mächtiger als die Funktionalität herkömmlicher Cloning-Werkzeuge.

Ein wichtiger Teil der NetInstall Umgebung ist der **NullWindows-Assistent**. Er verwaltet möglichst applikationsfreie Betriebssysteminstallationen, auf deren Basis die Aufzeichnung der Installationsprojekte erfolgt. Der NullWindows-Assistent erstellt Sicherungskopien dieser Betriebssysteminstallationen, so dass nach Veränderung durch die Installation eines Anwendungsprogramms, die Betriebssysteminstallation auf den Ursprungsstand zurückgesetzt werden kann. Eine vernünftig konfigurierte Ausgangsumgebung mit möglichst wenig Störeinflüssen durch vorhandene Applikationen verbessert und vereinfacht die Aufzeichnungsqualität der Projekte.

Als leistungsstarkes Verwaltungswerkzeug für die Projektdatenbank beinhaltet NetInstall den **NetInstall Manager (Bild 2)**. Hier können die Projekte bearbeitet und angepasst und über Vergabe von Berechtigungen zur interaktiven oder automatischen Installation freigegeben werden. Zudem wird über den NetInstall Manager die gesamte Konfiguration zentral gesteuert.





**Bild 2:** Der NetInstall Manager im Überblick

Zum erweiterten Angebot von NetInstall gehören einige **AddOns** für Reporting-Funktionen, Rechnerferninstallation, erweiterte Datenbank Funktionalität. Darauf wird hier aber nicht weiter eingegangen.

### 3 NetInstall am IMW

#### 3.1 Einführung und Installation

Mit der Rechnerumstellung auf PCs zum Juli 2000 wurde auch NetInstall mit der Version 5.0 SE am IMW eingerichtet. Ein Umfang von über 30 Rechnern mit Windows NT Betriebssystem bei zunehmender Tendenz war zu verwalten.

Zur Basisinstallation von NetInstall gehörte die Installation der Hauptprogrammkomponenten auf einem Zentralserver von einem Client aus. Zusammen mit den Programmkomponenten und der Projektdatenbank liegen auch die, bei den Aufzeichnungen der Projekte entstehenden, kompletten Projektdefinitionen und -dateien in der Verzeichnisstruktur des NetInstall-Basisverzeichnisses. Dieses Verzeichnis ist mit entsprechenden Berechtigungen freigegeben, damit normale Client-Benutzer später auch interaktiv Zugriff auf die Projekte haben und die NetInstall Administratoren den Vollzugriff zur kompletten Verwaltung haben.

Die Verwaltung von NetInstall wird von einer Client-Arbeitsstation aus organisiert. Auf diesem Rechner wurde eine Testumgebung basierend auf Windows NT 4 eingerichtet und durch den NullWindows Assistenten gesichert. Diese Basisinstallation bildete den Ausgangszustand für die Projekterstellungen.

Am IMW wurde nur eine Testumgebung initialisiert. Anpassungen wurden jeweils vor der Aufzeichnung eines Ist-Zustands konfiguriert.

Für den NetInstall Dienst wurde noch ein spezielles Benutzerkonto mit den Rechten eines Domänen-Administrators eingerichtet, mit dem die NetInstall Dienste (NI Service und SIS - Service Installation Service) auf den NetInstall Server zugreifen. Der NetInstall Service übernimmt die Ausführung von Funktionen (z.B.: Kopieren, Registryeinträge), für die der angemeldete Benutzer keine Rechte besitzt. Der SIS instal-

liert den Service auf den Clients.

#### 3.2 Einsatz am IMW

Mit der Einführung von NetInstall am IMW wurden zunächst erste Probeprojekte erstellt und getestet. Jedoch mit der leichten Einarbeitung und schnellen Sammlung von Erfahrungen weitete sich der Umfang der vorhandenen Projekte und Einsatzgebiete schnell aus. NetInstall wurde so zu einem festen Bestandteil der Rechneradministration.

Ein Basispaket an Software wurde festgelegt, das auf jedem Mitarbeiter-Rechner zur Verfügung stehen sollte. Zu diesem Paket zählten u.a. die Grundausstattung einer Office-Anwendung mit Mail-Client, einer Datenbankanwendung, einer X-Terminalsoftware und Basis Viewer. Aufbauend auf diesem Basispaket wurden neue Software-Projekte sukzessive hinzugefügt. Erweitert wurden die Software-Pakete schnell mit Systemfunktionen, wie die Einrichtung eines Zeit-Services, Verteilung von lokalen Benutzern und speziellen Schriftarten.

Die Verteilung der Software wurde nicht einheitlich organisiert, da an einem Institut doch eine Vielzahl von unterschiedlicher Software benutzt wird. Da nur das Basispaket für jeden Rechner vorgegeben war, wurde weitere Software abhängig von Lizenzen und Benutzerbedürfnissen auf die Rechner aufgeteilt. Dafür wurden aber keine durchgehenden automatischen Ferninstallationen durchgeführt. Bei Neueinrichtungen von Rechnern war dies der Fall oder z.B. bei Einrichtung von Diensten. Ein Großteil wurde durch interaktive Installation der Benutzer durchgeführt. Benachrichtigung über Email infor-

mierte die User über neue Projekte, die dann je nach Bedarf von den Benutzern abgerufen wurden. Dies ermöglichte eine größere Variabilität, die aber optimal über die Organisation der Berechtigungen im NetInstall Manager kontrollierbar ist.

### 3.3 Migration auf NetInstall 5.5 SE

Mit der Einführung von ersten Windows 2000 Rechnern wurde ein Update von NetInstall auf die Version 5.5 Standard Edition notwendig. Durch das Einfahren eines neuen Servers musste auch der Basisrechner gewechselt werden.

Die Migration der Projekte verlief hierbei ohne Probleme, wie auch die Portierung der Projekte auf W2K. Einzig beim Import der Projekte gingen die Berechtigungen und Zeitplanungen verloren.

## 4 Resümee

NetInstall war bei der Einführung zwar neu für die Administratoren des IMW, aber durch die Übersichtlichkeit und der damit verbundenen kurzen Einarbeitungszeit in das Softwaremanagement-Tool konnte NetInstall sehr schnell effektiv eingesetzt werden. Und im Laufe des Einsatzes wurde NetInstall zu einem immer bedeutender werdenden Faktor im Bereich der Administration. Somit kann man feststellen, dass nach über einem Jahr des Einsatzes von NetInstall am IMW die erreichten Ergebnisse mit Einsparung von Zeit und Aufwand vollends zufriedenstellend sind.

Die Erstellung der einzelnen Installationsprojekte verlief generell recht problemlos, auch wenn zu meist eine kleine Nachbearbeitung des Skripts notwendig war. Dies war aber meistens weniger ein Problem von NetInstall, als das der Testumgebung und des Setup-Programms, und wird mit ein wenig Erfahrung zu einer Routineangelegenheit.

Die Aufbereitung der Setup-Programme in Installationsprojekten bietet mehrere Vorteile. Durch die Bearbeitbarkeit und Anpassbarkeit der Projekte besteht die Möglichkeit diese zu optimieren und somit eine verbesserte Qualität der Installationen zu erzeugen, was stabiler laufende PCs zur Folge hat. Durch die Erstellung von Versionen und Varianten besteht die Möglichkeit, ein Installationsprojekt zu erzeugen, das z.B. eventuelle Servicepacks integriert und am Ende nur eine Installation durchgeführt werden muss. Abgefangen werden können so auch Probleme, wenn z.B. die Lizenznummer erst beim ersten Start des Programms abgefragt wird, was sonst jeweils einen Anruf beim Administrator kostete. Die Installation oder eher das Ko-

pieren der Programme auf die Clients erfolgt in einem wesentlich kürzeren Zeitraum als eine CD-Installation. Dadurch dass die Projekte vordefiniert sind und nicht auf Informationen der Rechnerkonfiguration angewiesen sind, kann man auch mehrere Projekte en bloc installieren ohne jeweils einen Neustart des Rechners durchzuführen, was wohl jeden Administrator schon genervt hat.

Die Funktionalität von NetInstall ermöglicht eindeutig auch eine verbesserte und einfachere Wartung. Durch die Freigabe von Projekten über Berechtigungen für Rechner oder Benutzer kann man leicht eine übersichtliche Lizenzverwaltung organisieren. Abhängig von der Anzahl vorhandener Lizenzen werden entsprechende Freigaben erteilt und die Client-Benutzer sehen nur die Projekte im Installer und können dementsprechend nur jene installieren, für die sie berechtigt sind. Als ein weiterer großer Vorteil der Organisation in Installationsprojekten für den Bereich der Wartung stellte sich die Handhabung bei Softwareproblemen dar. Ist eine Software während des Betriebs beschädigt worden, konnte man auf eine aufwendige Fehlersuche verzichten und mit einer Neuinstallation das Problem beheben, was oft eine immense Zeitersparnis bedeutete. Und in Fällen von Deinstallationen von Software kann diese direkt ausgeführt werden, ohne dass z.B. in einer Suchaktion CDs organisiert werden müssten.

Alles in allem hat sich der Einsatz von NetInstall am IMW rentiert, auch aufgrund der ansprechenden Preispolitik der NetSupport GmbH. Der konzeptionelle Aufbau mit vom System unabhängigen Installationsprojekten hat sich am IMW eindeutig bewährt.

Weitere Informationen zu NetInstall und der NetSupport GmbH sind im WWW nachzulesen unter <http://www.netinstall.de/>.

## 5 Zusammenfassung

Um dem durch eine Rechnerumstellung zunehmenden Administrationsaufwand am IMW Herr zu werden, wurde am IMW das Softwareverteilungs- und Client-Management-Tool NetInstall eingesetzt. Basierend auf der Erstellung, Berechtigung und Verteilung von Installationsprojekten und ausgestattet mit einem großen Funktionsumfang zur Client-Wartung bewährte sich das Tool im nun über einem Jahr währenden Einsatz am Institut. Eine effizientere und zeitsparendere Administration war möglich.



## Ausbau der Asienkooperationen des IMW

Düsing, C.

*Der Bereich der Hochschulkooperationen mit asiatischen Institutionen hat im Institut für Maschinenwesen eine lange Tradition. Nun ist es gelungen, zusammen mit der University of Wales, Cardiff, UK und der University of Patras, Griechenland ein von der Europäischen Union gefördertes Kooperationsprojekt mit Universitäten aus Thailand und Malaysia zu beginnen. Der folgende Artikel beschreibt kurz die Inhalte und Rahmenbedingungen der Kooperation.*

*The university-co-operation with Asian institutions has been performed at the Institut für Maschinenwesen for several years. This year, the Institute started a European Commission funded Co-operation-project together with the University of Wales, Cardiff, UK, the University of Patras, Greece and Universities of Thailand and Malaysia. This paper describes briefly the contents and the framework of the co-operation.*

### 1 Einleitung

Das Institut für Maschinenwesen kooperiert schon seit langem mit asiatischen Hochschulen. Dies kann vor allem auch dadurch belegt werden, daß der Institutsleiter, Prof. Dr.-Ing. Dietz bereits seit 1992 Mitglied und Professor der Technischen Universität von Liaoning in China ist. Im letzten Jahr konnte dann zudem ein Kontaktbüro der deutschen Universitäten Niedersachsens in Beijing eröffnet werden. Es ist das stete Bestreben des IMW, dessen internationale, wissenschaftliche Kooperationen zu pflegen und auszubauen.

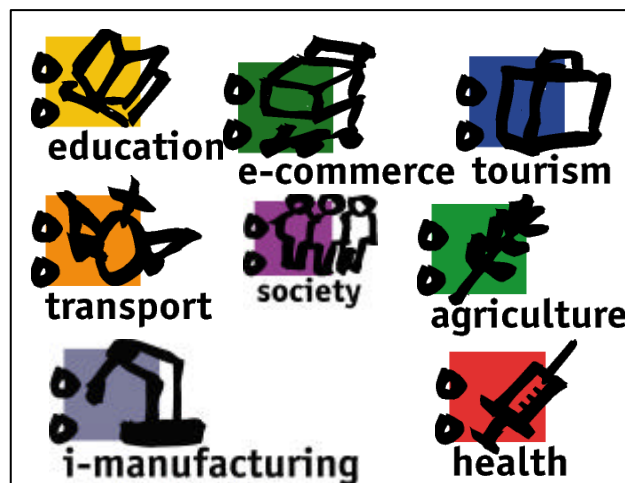
Im Rahmen des Asia IT&C Programms der Europäischen Union, welches im folgenden Abschnitt kurz beschrieben werden soll, konnte erfolgreich ein Projektantrag eingereicht werden, bei dem das Institut für Maschinenwesen zusammen mit der University of Wales und der University of Patras mit zwei Universitäten aus Thailand und Malaysia kooperieren.

### 2 Das Asia IT&C Programm

Das Asia IT&C (Information Technology & Communication) Programm ist ein von der Europäischen Union finanziertes Programm zur Unterstützung von Projekten im Bereich der Informationstechnolo-

gie von Institutionen innerhalb der EU und 17 verschiedenen asiatischen Staaten.

Das Hauptziel dieses Programmes, welches seit 1999 existiert, ist es, die gegenseitig nützlich ökonomische Kooperation zwischen der EU und Asien zu fördern und weiter zu entwickeln /1/.



**Bild 1:** Aktivitätsbereiche des Asien-Kooperationsprogramms der EU.

Innerhalb dieses Programmes werden im wesentlichen sechs verschiedene Aktivitätsbereiche berücksichtigt (siehe **Bild 1**). Diese wiederum sind in sechs verschiedene Kategorien klassifiziert.

Die für das Kooperationsprojekt relevante Kategorie nennt sich „Liaise with European IT&C Initiatives and Programmes“ aus dem Bereich I-manufacturing. Hierbei geht es im wesentlichen darum, die Identifikation und Etablierung von Task Forces, Workshops und/oder anderen Veranstaltungen, mit dem Ziel der Erleichterung und Verbesserung von Kontakten, Beteiligung und Transfer von Expertenwissen der Asiatischen Staaten zur Entwicklung und Implementierung von Europäischen IT&C Initiativen.

Im folgenden Abschnitt soll kurz auf die Inhalte des in diesem Liaison Bereich neu gestarteten Projektes eingegangen werden.

### 3 Projektinhalt

Das hier angesprochene Projekt wurde im Oktober 2001 unter dem Namen APoST (Advanced product-support technologies network“) gestartet.

Das Konsortium setzt sich aus fünf Universitäten im Verhältnis von drei europäischen (England, Deutschland, Griechenland) zu zwei asiatischen (Thailand und Malaysia) Staaten zusammen.

Die Hauptziele des Kooperationsprojektes können wie folgt beschrieben werden.

- Aufbau von TDC's (Technology Demonstration Center) in Malaysia und Thailand um Durchführbarkeitsstudien von Virtual Manufacturing (VM)- und Rapid Prototyping Projekten zu ermöglichen, sowie um Informationen über diese fortschrittlichen Konzepte über Produktentwicklung und Herstellung zur Verfügung zu stellen.
- Die Entwicklung von zwei Virtual Manufacturing Pilotanwendungen, eine im Bereich Produktgestaltung und eine im Bereich Systementwicklung.
- Die Steigerung des Bewußtseins asiatischer KMU's über die Möglichkeiten dieser fortschrittlichen Methoden und die Demonstration von Rapid Prototyping als eine neue Technologie um schnell virtuelle Prototypen (in der Regel als 3D CAD Objekte) in physikalische Prototypen umzusetzen.
- Die Steigerung des Bewußtseins asiatischer Unternehmen über den Einsatz von IT Werkzeugen um den Concurrent Design Prozess zu unterstützen als zukünftige Unternehmensstrategie.
- Asiatische Unternehmen in die Lage zu versetzen, das Leistungspotenzial im Zusammenhang mit der Implementierung von Virtual Manufacturing und Rapid Prototyping zu kalkulieren.

#### 4 Erwartete Ergebnisse:

Die hauptsächlichen Nutznießer des Projektes werden überwiegend kleine und mittelständische asiatische Unternehmen der Fertigungsindustrie sein. Die Firmen werden in der Lage sein, die Einrichtungen der Technology Demonstration Center zu nutzen und gezielt Vorteile aus dem Wissen und den Fähigkeiten ihrer Angestellten zu ziehen. Sie werden von den Virtual Manufacturing Demonstrationen profitieren, da ihnen somit direkt das daraus resultierende Potenzial aufgezeigt werden kann.

Der Nutzen für Studenten liegt in dem Erlernen neuer Fähigkeiten und der direkten Auseinandersetzung mit der industriellen Realisierung und Anwendung. Folglich haben die Unternehmen die

Möglichkeit, bei Stellenbesetzungen auf eine große Anzahl gut ausgebildeter Absolventen zuzugreifen.

Seminare, Workshops und Einführungskurse werden für die asiatischen KMU's ein- und durchgeführt werden. Diese Kurse sind zudem auch für die Studenten an den Universitäten von Vorteil da sie somit ständig auf dem aktuellsten Stand der Entwicklung im Bereich Virtual Manufacturing und Rapid Prototyping gehalten werden.

Das Konsortium strebt es an, jeweils eng mit den nationalen wissenschaftlichen Einrichtungen und Industrievertretungen zusammenzuarbeiten, um auch auf dieser Ebene ausgedehnte Informationsverbreitung über das Potenzial von Virtual Manufacturing zu betreiben.

Ergebnisse, Erfahrungen und Möglichkeiten werden vierteljährlich in einem Newsletter sowie kontinuierlich im World Wide Web veröffentlicht werden, um den Informationsgehalt in dieser sich sehr schnell verändernden Disziplin stets aktuell zu halten

Das Projekt hat zunächst eine Gesamtlaufzeit von zwei Jahren. Da auf Basis der erzielten Ergebnisse die Beziehungen mit Asien weiter ausgebaut werden sollen, wurde inzwischen schon ein Nachfolgeantrag eingereicht. Bei diesem sollen im wesentlichen die entstandenen Technology Demonstration Center in Thailand in Malaysia weiter ausgebaut werden, sowie auf Grundlage der bisher gemachten Erfahrungen ebenso in Vietnam ein TDC eingerichtet werden.

#### 5 Zusammenfassung

Dieser Artikel hat kurz die Fortsetzung der Kooperationsaktivitäten des IMW mit asiatischen Hochschulen vorgestellt. Neben dem zugrunde liegenden Programm und dem Inhalt des Kooperationsprojektes wurden auch die strategischen Ziele sowie eine weiterführende Kooperation dargelegt.

#### 6 Literatur

/1/ <http://www.asia-ipc.org>, 1999

# Das Problem der Sicherheitsfaktoren von ausgewählten Elementen einer Förderanlage im Bergbau

Siemieniec, A.; Wolny, S.

## 1 Einleitung

Bereits vor einigen Jahrzehnten hat man festgestellt, dass es nötig ist, die Methoden für Festigkeitsberechnungen der Elemente einer Förderanlage zu novellieren, was durch eine Reihe theoretischer und experimenteller Forschungsarbeiten u.a. /4/ und /5/ im Bereich der Identifizierung ihrer Belastungen begleitet wurde. Man wies einen wesentlichen Unterschied zwischen den tatsächlichen Belastungswerten und den Belastungswerten nach, die aufgrund der gültigen Richtlinien (aktuell /6/) angenommen wurden, insbesondere beim Anwachsen der Tragfähigkeit, Fördergeschwindigkeit und -tiefe.

In dieser Situation, mit der begrenzten Kenntnis des Spannungszustands in den Elementen einer Förderanlage in der Phase des Entwurfs und des Betriebs, scheint es problematisch und in manchen Fällen sogar unmöglich, Prognosen über die Zeitdauer ihres sicheren Betriebes zu stellen.

Für eine aussagefähige Berechnung nach der Methode der Finiten-Elemente für die Bestimmung der Grenzstände und Bewertung der Sicherheit solcher Konstruktionen, und die Anwendung der Methoden der Ermüdungsfestigkeit für die Festlegung der sicheren Betriebszeit, ist es notwendig:

1. Dynamische Analysen im Betrieb von diesen Elementen bei allen möglichen Betriebs- und Havariefällen durchzuführen.
2. Optimalbelastungen von einzelnen Elementen des Fördergefäßes als Funktion der Konstruktions- und Bewegungsparameter des Systems zu ermitteln.
3. Ermüdungsfestigkeitsanalyse von ausgewählten Elementen und Knotenpunkten des Fördergefäßes als Funktion ihrer Betriebszeit und der Art der Förderanlage durchzuführen.

Die Ergebnisse der Analysen, die in den Punkten 1-3 dargestellt wurde, bilden die Grundlage für die „Erstellung von Bewertungskriterien des technischen Zustands von Elementen des Fördergefäßes bei besonderer Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit als Funktion der Betriebszeit und der Art der Förderanlage“.

Die Werte von tatsächlichen Belastungen der Elemente des Fördergefäßes wurden nach der Durchführung der dynamischen Analyse von Betriebsfällen ermittelt, was für den Fall der Notbremsung in den Artikeln /4/ und /7/ und während der Rangierbremsung und im normalen Betrieb in den Abhandlungen /2/ und /5/ dargestellt wurde. Die Ergebnisse von diesen Analysen wurden verifiziert, indem man die gemessenen Belastungen vom Hängezeug des Fördergefäßes in den analysierten Phasen des Betriebs der Förderanlage mit den Berechneten verglichen hat, worüber u.a. dieser Artikel berichtet.

## 2 Messungen von Kräften im Hängezeug des Fördergefäßes am realen Objekt während der Rangierbremsung.

Die erzielten Ergebnisse der durchgeführten theoretischen Analyse /2/ /4/ /5/ /7/ wurden mit Hilfe von Versuchen verifiziert, indem man Messungen von Kräften in ausgewählten Elementen des Hängezeugs des Gefäßes der Bergbauförderanlage während der Rangierbremsung am realen Objekt in einem Schacht eines polnischen Bergwerks durchgeführt hat.

### 2.1 Wichtige technische Daten der Förderanlage, auf der das Experiment durchgeführt wurde

Technische Daten:

Maschinentyp: 4L-4000/2900

Antrieb: Gleichstrommotor 2900 kW

Nenndrehzahl: 77 min<sup>-1</sup>

Höchstgeschwindigkeit des Schachtfördergefäßes:  $v = 16 \text{ m/s}$

Masse des vollständigen Gefäßes mit

Hängezeug:  $m_{ku} = 16500 \text{ kg}$

Nutzmasse:  $m_u = 17000 \text{ kg}$

Schwungmoment der Drehelemente ( $GD^2$ ):

a) Schwungmoment der Trommel

$$GD_B^2 = 1868.8 \text{ [kNm}^2\text{]}$$

b) Schwungmoment des Motorrotors

$$GD_s^2 = 1275.3 \text{ [kNm}^2\text{]}$$

c) Schwungmoment der Lenkscheiben

$$GD_K^2 = 474 \text{ [kNm}^2\text{]}$$

## 2.2 Messstelle zur Registrierung der Kräfte im Hängezeug der Gefäße

Das Schema der Messstelle zur Registrierung der Kräfte im Hängezeug der Gefäße wurde auf **Bild 1 /2/** dargestellt. Die Messungen wurden mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen der WSP-Kraft mit folgenden technischen Daten durchgeführt:

Messbereich: 100 kN

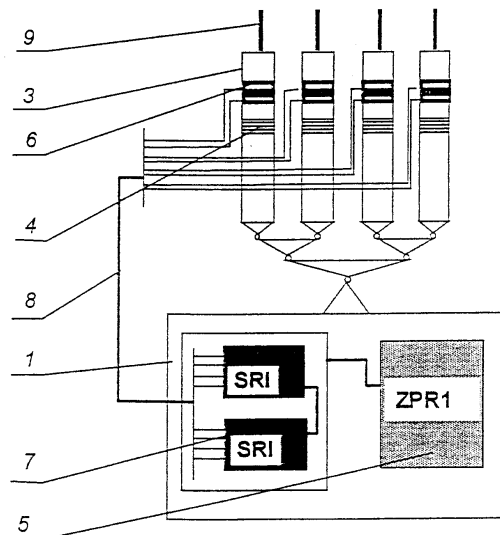
Ausgangsspannung: 5 V

Genauigkeitsgrad: 0,6

Brückeneinspeisung: 5 V

Schema des Messpfades und der Anordnung von Dehnungsmessstreifen

9. Tragseil
8. Hochstädter-kabel
7. SRI-Abzweigkasten
6. WSP-Dehnungsmessstreifen
5. ZPR1 Registriergerät
4. Reguliereinlage
3. Zugband des Hängezeugs
2. Tragseil
1. Kopf des Schachtfördergefäßes



**Bild 1:** Schema des Messpfades und Anordnung von Dehnungsmessstreifen

Für die Registrierung von Signalen wurde die ZPR-1-Vorrichtung benutzt, die mittels des HP-Akkumulators mit der Spannung von  $2,6 \pm 12 \text{ V}$  eingespeist wird. Die Messsignale von acht Dehnungsmessstreifen (je zwei pro Zugband) wurden mit der Frequenz von 40 kHz geprüft. Die von einzelnen Kanälen registrierten Signale wurden, in Textdateien konvertiert, summiert und weiter durch ein Matlab 5.2-Programm verarbeitet. Während aller Messungen wurde die Umfangsgeschwindigkeit auf der Treibscheibe registriert.

## 2.3 Ergebnisse der durchgeführten Messungen von Kräften im Hängezeug des Gefäßes während der Rangierbremsung.

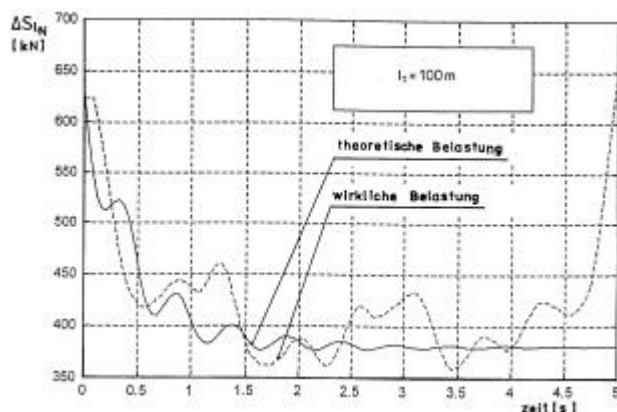
In diesem Teil des Artikels beschränken wir uns auf die Darstellung der Messergebnisse von Kräften im Hängezeug des Fördergefäßes, dass auf die Hängebank während der Rangierbremsung der Förderanlage zuführt, die technischen Daten der Anlage wurden oben angegeben.

Auf **Bild 2** wurde mittels einer Strichlinie die tatsächliche Belastung des Hängezeugs während der Rangierbremsung beim Zufahren auf die Hängebank ( $l_1=100\text{m}$ ) dargestellt.

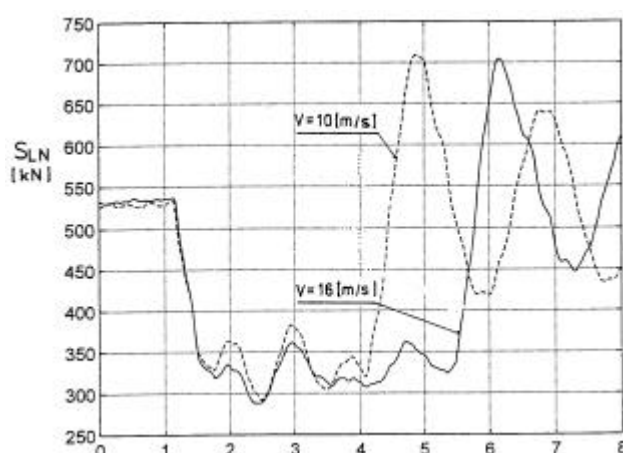
Mittels der kontinuierlichen Linie stellte man hingegen die Änderung der Belastung des Hängezeugs des Gefäßes dar, die auf theoretischem Wege errechnet wurde /4/ und /5/.

Auf **Bild 3** wurde hingegen die Änderung der Belastung des Hängezeugs des Gefäßes während der Rangierbremsung dargestellt, die bei verschiedenen Geschwindigkeiten gemessen wurde (Betriebsgeschwindigkeiten)  $V_0=V=10 \text{ m/s}$  (Strichlinie) und  $V_0=V=16 \text{ m/s}$  (volle Linie). Die Entfernung des beladenen Fördergefäßes von der Treibscheibe betrug während der durchgeführten Rangierbremsung  $l_1=540\text{m}$ .

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen - im Betrieb auf die Messung von Kräften im Hängezeug des Gefäßes beschränkt - stimmen mit Ergebnissen von entsprechenden Simulationen überein, die sich auf die Ergebnisse der dynamischen Analyse von /4/ und /5/ stützen. Die Unterschiede im Verlauf der gemessenen und der theoretisch berechneten Zeitwerte der Lastgrößen, welche die Kräfte im Hängezeug der Gefäße bei der Rangierbremsung charakterisieren, weichen in Extremfällen nur einige Prozente ab (siehe Diagramm Bild 3).



**Bild 2:** Diagramm der Änderung der Belastung des Hängezeugs des Gefäßes während der Rangierbremsung, wobei die Länge des Tragseils vom Gefäß zur Treibscheibe  $l_1 = 100$  m beträgt.



**Bild 3:** Änderung der Belastung des Hängezeugs des Fördergefäßes während der Rangierbremsung bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten der festgelegten Fahrt ( $l_1 = 540$  m)

Außerdem, was zu betonen ist, hängt der Wert der dynamischen Überlast im Hängezeug des Gefäßes während der Bremsung nicht von der Geschwindigkeit der festgelegten Fahrt  $V_0$  ab, bei der der Vorgang der Rangierbremsung begonnen hat.

### 3 Analyse des Spannungszustands in ausgewählten Elementen der Bergbauförderanlage.

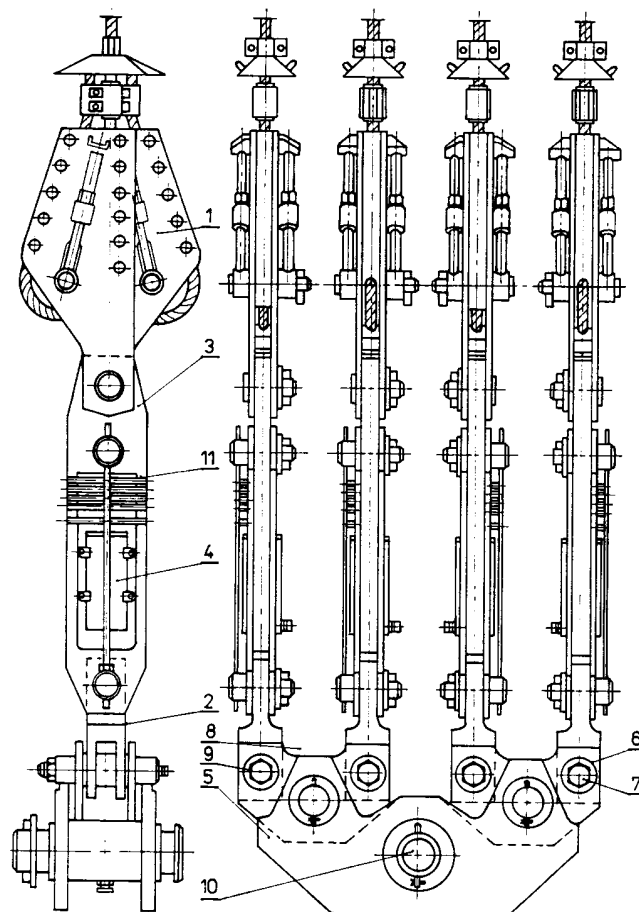
Das Ziel der durchgeführten Festigkeitsanalyse von ausgewählten Elementen der Bergbauförderanlage (im Artikel auf Elemente des Hängezeugs der Fördergefäße und Unterseilen beschränkt) war, eine vollständige Informationen über den Spannungszustand zu bekommen, der in ihren Bestandteilen unter dem Einfluss von Betriebsbelastungen entsteht.

Die Kenntnis von Maximalwerten der Spannungs-komponenten in einem Element bildet die Grundlage für die Bewertung von dessen Festigkeit und Dauerhaftigkeit (der zulässigen Betriebsdauer).

Man analysierte die Belastungskomponenten des Hängezeugs, dass am Gefäß der Förderanlage befestigt wurde, an dem die Messungen ihrer Belastung im normalen Betrieb und auch während der Rangierbremsung durchgeführt wurden. Auf **Bild 4** wurde das Schema von diesem Hängezeug dargestellt. Es ist das Vierseilhängezeug mit Einpunktbefestigung am Fördergefäß.

Das auf Bild 4 dargestellte Hängezeug enthält folgende Elemente (die in der Ermüdungsfestigkeitsanalyse betrachtet wurden):

- Kreuzverbindungsstück (2),
- großer Winkelhebel (5),
- kleiner Winkelhebel (6),
- Außenlasche (3),
- Innenlasche (4).



**Bild 4:** Konstruktionsschema des Vierseilhängezeugs mit Einpunktbefestigung am Fördergefäß

Die Belastungen aller Elemente des oben beschriebenen Hängezeugs bilden die durch die Trageile übertragenen Kräfte. In der **Tabelle 1** stellte man Nennbelastungen und Betriebsbelastungen (maximale und minimale) des analysierten Hängezeugs zusammen.

Analysiertes Hängezeug	Nennlast	Max. Last	Min. Last
	$Q_n$ [kN]	$Q_{e \max}$	$Q_{e \min}$
Vierseilhängezeug mit Einpunktbefestigung am Fördergefäß	880	682,5	167,9

**Tabelle 1:** Lasten des analysierten Hängezeugs

Aufgrund der durchgeführten Analyse /3/ bekam man eine vollständige Information über den Spannungszustand in allen Knotenpunkten des Netzes, in das die Modelle der Hängezeugelemente eingeteilt wurden.

Auf **Bild 5** wurden beispielhaft Schichtlinien von Spannungskomponenten in einem der Hängezeugelemente dargestellt. Es sind reduzierte Spannungen (Vergleichsspannung), die mit Hilfe der Huber-Hypothese (Von Mises) errechnet wurden.

In der **Tabelle 2** wurden hingegen, für ausgewählte Elemente des analysierten Hängezeugs, die für sie berechneten Maximalwerte der reduzierten Spannung dargestellt, die durch die entsprechende maximal zulässige statische Belastung (Nennbelastung)  $Q_n$ , beziehungsweise durch die maximale Betriebsbelastung  $Q_e$  hervorgerufen wurden.

Name des Elements	Nennbelastung $Q_n=880$ kN			Betriebsbelastung $Q_e = 683$ kN		
	Sicherheitsfaktor			Sicherheitsfaktor		
	Max. reduzierte Spannung $\sigma_{zn}$ [MPa]	$n_{1n}=R_g/\sigma_{zn}$	$n_{2n}=R_m/\sigma_{zn}$	Max. reduzierte Spannung [MPa]	$n_{1e}=R_g/\sigma_{ze}$	$n_{2e}=R_m/\sigma_{ze}$
großer Winkelhebel	72	3,8	7,2	56	4,9	9,3
kleiner Winkelhebel	97	2,8	5,4	75	3,7	6,9
Innenlasche	109	2,5	4,8	85	3,2	6,1
Außenlasche	75	3,7	6,9	58	4,7	9,0
Kreuzverbindungsstück	103	2,78	5,0	80	3,4	6,5

**Tabelle 2:** Maximalwerte der Vergleichsspannungen nach v. Mises für das Vierseilhängezeug mit Einpunktbefestigung am Fördergefäß

In dieser Tabelle wurden auch die Werte von entsprechend berechneten Sicherheitsfaktoren angegeben. Die Werte von diesen Faktoren wurden ermittelt als Verhältnis der maximalen Spannung in einem Element zu der Fließgrenze  $R_e = 275$  MPa, beziehungsweise zu der jeweiligen Zugfestigkeit des Werkstoffes  $R_m = 520$  MPa, aus dem die Elemente des analysierten Hängezeugs hergestellt wurden d.h. der Stahlsorte 35.

Die für die einzelnen mit der Betriebsbelastung belasteten Elemente ermittelten Sicherheitsfaktoren liegen in den Grenzen  $n_n = 2.5 \div 3.8$  im Bezug auf die maximalen Vergleichsspannungen und Fließgrenze, und  $n_e = 6.1 \div 9.3$  beim Vergleich von diesen Spannungen mit der jeweiligen Zugfestigkeit.

#### 4 Zusammenfassung

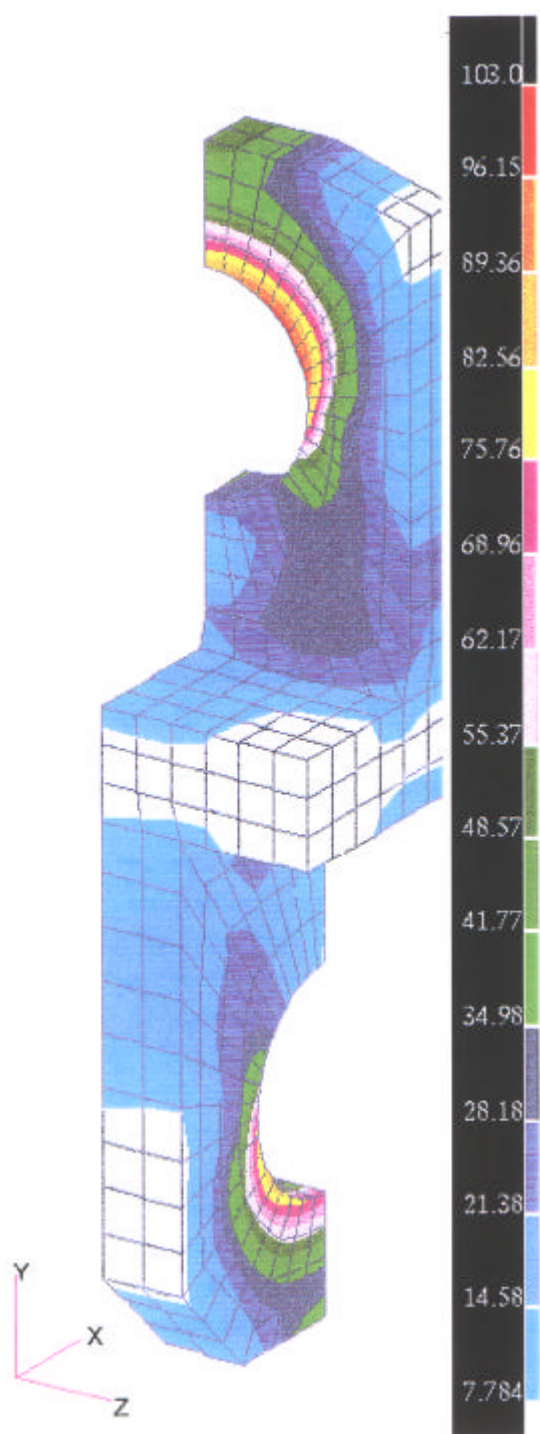
Die Erstellung von Kriterien zur Bewertung des technischen Zustands von Elementen der Bergbauförderanlage, darunter des Hängezeugs der Fördergefäße und der Unterseile, mit besonderer Berücksichtigung der Ermüdungsfestigkeit als Funktion der Betriebszeit und der Art der Förderanlage, erfordert die Durchführung einer gründlichen Ermüdungsfestigkeitsanalyse, die tatsächliche Belastungen und Änderungen der Belastung in der Zeit berücksichtigt.

Man kann diese Berechnungen aber nicht ohne eingehende Untersuchungen der Dynamik der Vorgängen, die im normalen Betrieb oder bei Havarien ablaufen, aufstellen. Die durchgeführten dynamischen Analysen und Messungen ergaben die

Funktion der Belastungen von ausgewählten Elementen der Vorrichtung für den vollen Betriebszyklus. Die durchgeführten Festigkeitsberechnungen von ausgewählten Hängezeugelementen des Fördergefäßes erlaubten es hingegen, aufgrund von ermittelten Maximalwerten der Belastungen, den Spannungszustand im ganzen Bereich des analysierten Hängezeugelements zu bestimmen. Auf dieser Grundlage wurde es möglich,

den auf die Dehngrenze und die jeweilige Festigkeit bezogenen Sicherheitsfaktor zu berechnen.





**Bild 5:** Kreuzverbindungsstück. Verteilung der reduzierten Spannung  $\sigma_z$ .

## 5 Literatur

- /1/ Gerlich A., Horstmann R.: Seilrutschverhalten von Treibscheibenanlagen unter Berücksichtigung dynamischer Vorgänge. Glückauf - Forschungshefte 54, Nr.5 1999 S. 213÷218
- /2/ Smieja M.: Analytische und experimentelle Beurteilung von Sicherheitsfaktoren der ausgewählten Elemente des Bergbauförderanlage. Doktorarbeit, AGH, unveröffentlicht Kraków S. 1÷88. 2000.
- /3/ Wolny S., Dzik S., Die Prüfung des Spannungszustands in den Hängezeugelementen der Bergbauförderanlagen. Die 13. Tagung der Experimentalmechanik des Festkörpers Jachranka 1998, S. 455÷460
- /4/ Wolny S.: Dynamische Belastungen im Hängezeug der Fördergefäße und Unterseile während der Notbremsung der Bergbauförderanlage. ZN AGH Vierteljahresschrift Mechanika B.19, Heft 1 Kraków 2000, S.121÷130
- /5/ Wolny S.: Ausgewählte Probleme der Dynamik und Festigkeit beim Betrieb von Bergbauförderanlagen. Monographien „Probleme der Mechanik und Robotik“ Nr. 1, Herausgeber Fakultät für Mechanik und Robotik AGH, Kraków 2000, S. 1÷123
- /6/ Anhang Nr. 17 zur Anordnung des Industrieministers vom 14.04.1995 „Anforderungen im Bereich der Konstruktion und Bedienung der Bergbauförderanlagen“.
- /7/ Siemieniec, A., Wolny S.: Analyse der Arbeitsverhältnisse einer Förderanlage während einer Notbremsung. Institut für Maschinenwesen. Mitteilung Nr. 24 (1999) TU Clausthal S. 159ff.





## Technische Ausrüstung, Kooperationsangebote und Forschungsschwerpunkte des Institutes

### Institut

Die Lehre, Ausbildung, Forschung und Entwicklung am Fritz-Süchting-Institut für Maschinenwesen (IMW) deckt folgende Bereiche ab:

- Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen und Maschinenteilen
- Konstruktionssystematik
- Rechnereinsatz im Maschinenbau
- Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen
- Maschinenakustik
- Experimentelle Beanspruchungsermittlung und Spannungsoptik
- Technische Normung
- Rapid Prototyping / Rapid Tooling

Das interdisziplinäre Team am IMW besteht aus ca. 20 wissenschaftlichen Mitarbeitern/-innen aus den Bereichen Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Informatik und Geophysik. Weitere 11 Mitarbeiter/-innen und 8 Auszubildende arbeiten in der Verwaltung, mechanischen und elektrotechnischen Werkstatt.

### Technische Ausrüstung

Für die entsprechenden Forschungsschwerpunkte verfügt das IMW über gut ausgestattete Labore (Spannungsoptik, Akustik, CIM), verschiedene maschinentechnische Prüfstände und die notwendige Rechnerausstattung.

Die Untersuchung von Maschinenelementen kann auf zwei hydraulischen Verspannprüfständen, einem Torsions-Schwingprüfstand, einem Umlaufbiege- und Torsionsprüfstand, einer statischen Verspanneinrichtung sowie einer separaten Umlaufbiegeprüfeinrichtung durchgeführt werden. Zur Prüfung fördertechnischer Elemente und Anschlagmittel ist eine Zugprüfmaschine mit integriertem Querprüfgerät und ein Seiltrommelprüfstand vorhanden. Eventuelle berührungslose Übertragungen von Meßwerten werden mit einer 64 Kanal Telemetrieeinrichtung bewältigt. Ein Schleuderprüfstand für schnell drehende Maschinenteile (z.B. Rotoren, Abweiseradwindsichter), ein Prüfstand für Feinprallmühlen und eine Reaktions-schwingmühle ergänzen die Prüfeinrichtungen des IMW für Untersuchungen an verfahrenstechnischen Maschinen.

Das Labor für statische Spannungsoptik verfügt über Einrichtungen und Werkstattinfrastruktur für spannungsoptische Untersuchungen an Bauteilmodellen von mikroskopischer Größe bis zu einer Größe von ca. 1 m. Die hierzu zum Teil notwendige eigenspannungsarme Bearbeitung von Modellmaterialien werden von der Institutswerkstatt sachkundig ausgeführt ebenso wie die aufgabenspezifische Anfertigung von Belastungseinrichtungen. Die technische Ausstattung des Labors für dynamische Spannungsoptik ermöglicht Messungen an hochfrequent belasteten Bauteilen. Mittels eines elektrodynamischen Schwingerregers können Bauteile gezielt frequenzselektiven Belastungen bis zu einer Frequenz von 4 kHz unterworfen werden. Der Einsatz optischer Ganzfeldmeßverfahren ermöglicht darüber hinaus auch die Visualisierung sich einstellender Beanspruchungszustände, wie sie bei Stoßanregungen auftreten.

Das Akustiklabor am IMW ist mit umfangreichem Meßequipment sowie einem schallarmen Raum zur Erfassung und Auswertung des von Maschinenstrukturen abgestrahlten Schalldruck- und Schalleistungspegels ausgestattet. Neben Schmalbandanalysen mittels eines FFT-Analysators bietet ein verfügbarer Bandpaßfilter die Möglichkeit der Terz- und Oktavanalyse. Mittels eines Handschallpegelmessers können auch schnelle Vorortmessungen durchgeführt werden.

Das CIM-Labor besteht aus zwei 4-Achsen-Fräsmaschinen (MAHO MH700S/MH600), einer Drehmaschine (Monforts MNC 5), einer Senkerodiermaschine (CHARMILLER ROBOFORM 505) mit 3D-Bahnsteuerung, und einer ZEISS Koordinatenmeßmaschine mit NC-Rundtisch. Zur CAM-Lösung der Firma DLoG gehören ein werkstatorientiertes NC-Programmiersystem, Einrichtungen zur Direktübertragung von NC-Programmen an die Maschinensteuerungen und Anwendungen zur Maschinen-/Betriebsdatenerfassung sowie zur Maschinenzustandsanzeige. Als CAD/CAM-System wird SolidWorks und Pro/Engineer mit Pro/Manufacturing eingesetzt. Maschinenspezifische Postprozessoren erlauben eine durchgängige CAD/NC-Verfahrenskette. Als PDM-System kommt axalant™ der EIGNER + PARTNER AG auf einer ORACLE8i-Datenbank zum

Einsatz. Des weiteren wird in der Lehre SAP R/3 als PPS- und PDM-System eingesetzt.

Die Rechnerausstattung umfaßt mehrere Server, die die insgesamt ca. 130 Rechner des Institutes vernetzen. Diese umfassen u.a. verschiedene Internetserver (WWW/FTP), einen Windows NT Server, einen Server für Datenbankdienste und einen Abteilungs-Server SUN Enterprise 450 zum Betrieb der 60 SUN Workstations. Als Standardsoftware stehen eine Vielzahl von Programmen zur Verfügung, u. a. die CAD-Pakete ProEngineer und SolidWorks sowie die FEM-Programme MARC/ MENTAT und ProMechanica. Zur rechnerintegrierten Produktentwicklung steht ein Intergraphcomputer auf Intel-Architektur mit zugehöriger VR-Software zur Verfügung.

Das Institut für Maschinenwesen verfügt über eine vollständige Rapid Prototyping bzw. Rapid Tooling Verfahrenskette zum Lasersintern von metallischen Bauteilen. Hierzu gehören im Einzelnen eine Rapid Tooling Anlage EOSINT M 250 der Firma EOS, zum Generieren von Prototypen, Funktionsteilen und Werkzeugen (Formen und Elektroden), verschiedene Konstruktionsarbeitsplätze (ProE, SolidWorks, CATIA V5), Software zur Rapid Tooling gerechten Aufbereiten der CAD-Daten (Magics RP), Apparaturen und Geräte zum Infiltrieren und Beschichten der Sinterbauteile mit Harzen und niedrig schmelzenden Metallen, eine Sandstrahlkabine für verschiedene Strahlmedien (Stahlkugeln, Keramikpulver, Nussgranulat usw.) sowie Arbeitsplätze zur manuellen Nachbearbeitung der Rapid Tooling Erzeugnisse.

### **Kooperationsangebote**

Das IMW arbeitet in einer Vielzahl von Projekten in enger Kooperation mit namenhaften Industrieunternehmen in allen Tätigkeitsbereichen zusammen:

#### *Entwicklung, Konstruktion und Fertigung*

- Entwicklung neuer Konstruktionen (z.B. Prüfstände und Mühlen),
- Gestaltung von Maschinenelementen und Maschinenteilen,
- Fertigungsmöglichkeiten für Prüfkörper und Nullserien,
- Softwareentwicklung zur Simulation und Optimierung von Fertigungsverfahren und zur Unterstützung des Konstruktionsprozesses.
- Konstruktion und Herstellung von metallischen Formen, Funktionsteilen und Prototypen durch direktes Lasersintern (Rapid Tooling).

#### *Versuche, Messungen und Berechnungen*

- Durchführung von komplexen Festigkeitsberechnungen und -nachweisen mit Hilfe der FEM (2D/3D),
- Erarbeitung von Berechnungsansätzen für Maschinenelemente
- Schadensfallanalysen
- Vermessung und Qualitätskontrolle auf der Koordinatenmeßmaschine,
- DMS-Messungen unter Betriebsbedingungen an Maschinenteilen,
- Durchführung von maschinenakustischen Untersuchungen und Optimierungen,
- Durchführung von Verschleiß- und Festigkeitsuntersuchungen auf den Prüfständen.

#### *Beratung und Gutachten*

- Beratung, Untersuchung und Erstellung von Gutachten zur Bauteilfestigkeit,
- Beratung, Untersuchung und Gutachten zur Konstruktion lärmarmen Maschinen,
- Beratung zu Konstruktions- und Patentfragen,
- Beratung und Hilfestellung bei der Beantragung und Durchführung von nationalen und internationalen Forschungsprojekten.

Durch die interdisziplinäre Zusammensetzung werden im Institut auch Entwicklungsprojekte für komplette Maschinen und Steuerungen durchgeführt. Die Zusammenarbeit kann auch über Praktika, Studien- und Diplomarbeiten erfolgen.

Neben den oben aufgeführten Angeboten bietet das Institut für Maschinenwesen interessierten Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen, insbesondere kleinen und mittleren Unternehmen, Beratungen zu den europäischen Förderungsmaßnahmen an. Dies beinhaltet neben der Beratung zur Einwerbung von Fördermitteln auch Hilfestellung bei der Vorbereitung, der Durchführung und der Partner-suche bei europäischen Forschungsprojekten.

### **Forschungsschwerpunkte**

Die Forschungsschwerpunkte gliedern sich in folgende Bereiche:

#### *Konstruktion und Berechnung von Maschinenelementen*

Neben allgemeinen Fragen der Grundlagen des Maschinenwesens wie Beanspruchungsermittlung, Reibung, Verschleiß und Tragfähigkeit stehen folgende Maschinenelemente besonders im Vordergrund:

- Zahn- und Keilwellen-Verbindungen,
- Spielbehaftete Längsstift-Verbindungen,
- Innenhochdruckgefügte und konventionelle Preßverbindungen mit geometrischen Schwächungen (z.B. Axial- oder Radialbohrungen in Welle und/oder Nabe),
- Torsionssteife Doppelmembrankupplungen mit Ausgleichsfunktion in radialer und axialer Richtung,
- Seiltrommeln (ein- und mehrlagig bewickelt),
- Stahldrahtseile,
- Bolzen-Lasche Verbindungen,
- Verbindungstechnik Metall-Keramik bei hohen Temperaturen,
- Verbindungselemente unter hohen mechanischen und thermischen Belastungen.

Weitere Forschungsprojekte beschäftigen sich mit der Beanspruchungsanalyse und Optimierung stoßbelasteter Maschinenteile, mit der elasto-plastischen Beanspruchung von Maschinenelementen und der Entwicklung von Berechnungssoftware für Maschinenelemente.

#### *Konstruktionssystematik und Rechnereinsatz im Maschinenbau*

Die Entwicklung von Konstruktionsinformationssystemen zur Unterstützung des Produktentwicklers unter Einbeziehung aller Produktlebensphasen sind Gegenstand verschiedener Forschungsprojekte. Als Grundlage für ein phasenübergreifendes Arbeiten stehen insbesondere die Entwicklung von Schnittstellen und der Produktdatenaustausch (STEP ISO 10303/ISO 13584) im Vordergrund. Weitere Projekte beschäftigen sich mit:

- dem Management kooperativer Produktentwicklungsprozesse,
- dem Qualitätsmanagement in der Konstruktion,
- der Werkstoffauswahl in der Konstruktion,
- der Simulation, Berechnung und Optimierung von kinematisch komplexen Fertigungsverfahren (Zahnkantenabdachungen, Wirbelfräsen),
- Fehlermöglichkeitseinfluß- und Störfallanalysen,
- dem fertigungsgerechten Konstruieren insbesondere an Bauteilen aus Feinblech.

#### *Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen*

Schwerpunkt der Untersuchungen und Entwicklungen von verfahrenstechnischen Maschinen unter besonderen mechanischen, chemischen und thermischen Belastungen sind:

- Entwicklung von Reaktionsmühlen,
- Untersuchung der Zusammenhänge beim Prallmahlen,
- Gestaltung schnell laufender Rotoren (Windsichter/Prallmühlen),
- chemisches Recycling von Kunststoffen,
- Niedertemperaturrauchgasentschwefelung,
- Entwicklung lärmarmen, schnell laufender Mühlen.

Weitere Forschungsvorhaben beschäftigen sich mit KI-Systemen und der Konstruktionssystematik an Maschinen der Verfahrenstechnik und der Baureihenentwicklung.

#### *Maschinenakustik*

Im Rahmen der Maschinenakustik werden Forschungsarbeiten zur Lärminderung von Bauteilen und Maschinensystemen durchgeführt. Für experimentelle Untersuchungen und Entwicklungen zu Körperschall, Schallemission und Körperschallimpedanz- und Dämpfungselementen steht entsprechende Meßwerterfassungs- und Verarbeitungshard- und -software zur Verfügung. Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Entwicklung von Konstruktionssystematiken und von Beratungssystemen zur Konstruktion lärmarmen Maschinen.

#### *Rapid Prototyping / Rapid Tooling*

Die Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten auf dem Gebiet Rapid Prototyping / Rapid Tooling umfassen die gesamte Rapid Tooling Verfahrenskette.

Hierzu zählt im einzelnen:

- die Rapid Tooling gerechte CAD-Konstruktion,
- die Datenaufbereitung für den Sinterprozess,
- der Rapid Tooling Bauprozess einschließlich Untersuchungen der Sinterparameter und Sinterwerkstoffe und
- die Nachbearbeitung bzw. das Finishen der Sinterbauteile durch Beschichten und Infiltrieren.

Weiterhin werden die Anwendungsgebiete der Rapid Tooling Technologie betrachtet: wie z. B. die Herstellung von Elektroden für das funkenerosive Abtragen und das Sintern von Formen für den Gummi- und Kunststoffspritzguss oder Faserverbundkonstruktionen sowie das Generieren von Funktions- und Ein-

satzteilen mittels neu entwickelter Sinterwerkstoffe und Sinterstrategien.

## Veröffentlichungen des Institutes seit dem 1.1.1997

### Veröffentlichungen 1997

Dietz, P.; Kruse, P.J.; Leschonski, K.: Behandlung von Anforderungen in der Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse, Maschinen und Anlagen. Konstruktion, Heft 1/2, Januar 1997

Dietz, P.; Penschke, St.; Ort, A.: Ansätze zur parallelen Gestaltung von Produkten und Fertigungsprozessen. VDI Berichte 1322

Dietz, P.; Ort, A.: The Use of ISO 13584 Methodology for Building Part Hierarchies in Practice. European Conference Product Data Technology Days, 15.-16.4.1997, Sophia Antipolis

Dietz, P.; Penschke, St.; Ort, A.: Strategies for Product Knowledge Management and Feedback to Design - Application Examples. Workshop Product Knowledge Sharing and Integration, 17.-18.4.1997, Sophia Antipolis

Dietz, P.; Ort, A.; Penschke, St.: Perspectives on Design Support Strategies. IIM '97 European Conference on Integration in Manufacturing, 24.-26.9.1997, Dresden

Jakel, R.: Ein Beitrag zur Berechnung und konstruktiven Gestaltung keramischer Bauteile, angewendet am Beispiel eines keramischen Heißgasventilatorrades. Dissertation, TU Clausthal 1996.

Haje, D.: Entwicklung eines Informationssystems zur Konstruktion lärmarmen Produkte. Dissertation, TU Clausthal 1996, Lärmarm konstruieren XVII, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Forschung Fb 768 Arbeitsschutz, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW

Wesolowski, K.: Dreidimensionale Beanspruchungszustände und Festigkeitsnachweis drehmomentenbelasteter Zahnwellen-Verbindungen unter elastischer und teilplastischer Verformung. Dissertation, TU Clausthal 1996, VDI Fortschritt-Berichte Reihe 1: Konstruktionstechnik/Maschinenelemente Nr. 286, Düsseldorf: VDI Verlag

Dietz, P.; Burgtorf, U.: Das Beanspruchungsverhalten von Zahnwellenverbindungen mit Preßsitz. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Nr. 250 der FVA, Würzburg 1997

Dietz, P.; Klemp, E.: SIMDES. European Workshop on Environmental Technologies 1997, 10.- 12. Dezember 1997, Cranfield GB

Schiedeck, N.: Simulation und Optimierung kinematisch komplexer Fertigungsverfahren. Dissertation, TU Clausthal 1996.

### Veröffentlichungen 1998

Bönig, S.; Heimannsfeld, K.: A comparison of hazard analysis methods in plant design. 1st Internet Conference on Process Safety, Januar 1998

Dietz, P.; Ort, A.: The Concept of View in Parts Library – An Integrative Feature For The Design Process? European Conference Product Data Technology Days, 25./26.3.1998, Garston (Watford).

Dietz, P.; Ort, A.: Festlegungen für die optimale Merkmalerfassung und -organisation in einem Merkmallexikon. DIN Tagung "Merkmal-Lexikon in der Anwendung", 2.4.1998, Köln.

Dietz, P.; Wesolowski, K.; Burgtorf, U.; Garzke, M.: Betriebszustände und Tragfähigkeitsnachweis von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen. VDI-Tagung "Welle-Nabe-Verbindungen", 28./29.4.1998 Fulda VDI Berichte 1384

Dietz, P.; Tan, L.; Garzke, M.: Übertragungsfähigkeit und elastisch-plastische Auslegung geschwächter Welle-Nabe-Preßverbindungen. VDI-Tagung "Welle-Nabe-Verbindungen", 28./29.4. 1998 Fulda, VDI Berichte 1384

Burgtorf, U.; Dietz, P.; Garzke, M.: Calculation of In-volute Splines under Elastic Material Behaviour. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Garzke, M.; Dietz, P.; Tan, L.; Schäfer, G.: Transmission capabilities and elastic design of weakened shaft-hub shrink fits. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Ort, A.; Dietz, P.: Parts Library: An Application of Meta-Modelling in Design. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.

Dietz, P.; Penschke, S.; Ort, A.: Strategic Reuse of Product Data for Design. 5th International Design Conference DESIGN '98, 19.-22.5.1998, Dubrovnik/Kroatien.



Garzke, M.: Abschlußbericht zum DFG-Vorhaben "Statische und dynamische Beanspruchbarkeit von Zahnwellen-Verbindungen unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten", Di 289 / 9-2; Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Mai 1998.

Gieleßen, H.: Optische Anisotropie von texturiertem Silberchlorid. Dissertation, TU Clausthal 1997.

Dietz, P.; Ort, A.: Knowledge Representation in Design Using Parts Library. ProStep Science Days, 17./18.6.1998, Wuppertal.

Penschke, S.: Erfahrungswissen in der Produktentwicklung. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Schmidt, A.: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur konstruktiven Einflußnahme auf die Körperschalleitung in ebenen Strukturen. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Burgdorf, U.: Montage- und Betriebseigenschaften von Zahnwellen-Verbindungen mit Preßsitz. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Heinen, F.: Entwicklung einer Methodik zur Rückführungsvorhersage an Tiefziehteilen. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Dietz, P.; Schäfer, G.; Garzke, M.: Elastisch-plastische Auslegung von Maschinenelementen. 2. Workshop Konstruktionstechnik, 24./25.9.98 Kühlungsborn, Institut für Konstruktionstechnik der Universität Rostock.

Dietz, P.; Schmidt, A.; Jeschke, D.: Berechnung von Terzspektren aus der FFT-Analyse. Zeitschrift für Wärme-, Klima-, Schall- und Brandschutz. 43. Jg., Heft 41

Pawar, K.S.; Ratchev, S.; Heimannsfeld, K.: Knowledge Acquisition and sharing for Requirement Engineering (KARE) in one-of-a-kind production environment: Initial Concepts, current and future development. Conference PROLAMAT, September 1998, Trento/Italien.

### Veröffentlichungen 1999

Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. Peter Dietz. Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, Mai 1999.

Dietz, P.; Haje, D.: Entwicklung lärmarmen Produkte – Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur. Konstruktion 51 (1999), Heft 7/8.

Schmidt, A.: Untersuchungen zur konstruktiven Einflußnahme auf die Körperschalleitung in ebenen Strukturen. Konstruktion 51 (1999), Heft 7/8.

Dietz, P.: Tragfähigkeitssteigerungen von Maschinenelementen durch teilplastische Verformungen. Konstruktion 51 (1999), Heft 10.

Dietz P.; Grünendick T.: Reaktives Mahlen mit Hochleistungs-Schwingmühlen. Workshop Tribochemie/Reaktives Mahlen, 26.6.1999, DECHEMA e.V., Frankfurt

Dietz, P.; Käferstein, B.; Schmidt, A.: Optische Ganzfeldmeßmethoden und Analogiebildung zur Simulation der Körperschallausbreitung. VDI-Tagung "Maschinenakustik", 9./10.9.1999 Wiesloch, VDI Berichte 1491

Dietz, P.; Gummersbach, F.; Haje, D.: Entwicklung lärmarmen Produkte - Rechnergestützte Beratungshilfen für den Konstrukteur. VDI-Tagung "Maschinenakustik", 9./10.9.1999 Wiesloch, VDI Berichte 1491

Klemp, E.; Hickmann, T.: Rapid Tooling für Serienwerkzeuge? - Ein Test im Vergleich zu herkömmlichem Stahl. Der Stahlformenbauer 16 (1999), Heft 5.

Dignum, V.; Heimannsfeld, K.: Knowledge Management for requirements engineering. 12th Banff Knowledge Acquisition Workshop for knowledge-based systems, Volume 1, Banff, Canada, 1999

### Veröffentlichungen 2000

Schäfer, G.; Birkholz, H.; Garzke, M.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Festigkeitsverhalten von Membrankupplungen. AiF-Abschlussbericht, Institut für Maschinenwesen, TU Clausthal, April 2000

Henschel, J.: Dimensionierung von Windentrommeln. Dissertation, TU Clausthal 1999.

Schäfer, G.; Dietz, P.: Strategies for the Design of Process Engineering Machines under special mechanical, thermal and chemical Conditions. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Dietz, P.; Haje, D.: Development of low noise Products – Computer guidance for the Designer. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Birkholz, H.; Dietz, P.; Dehner, E.; Garzke, M.: TWINTORS-Diaphragm couplings for turbo machines. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Garzke, M.; Dietz, P.: Torque transmission capability of internal high pressure assembled press fits. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Otto, S.; Dietz, P.; Garzke, M.: Development of calculation basis for dimensioning axial pin connections with clearance. 6th International Design Conference DESIGN 2000, 23.-26.5.2000, Cavtat/Dubrovnik, Kroatien.

Ort, A.: Entwicklungsbegleitende Kalkulation mit Teilebibliotheken. Dissertation, TU Clausthal 1998.

Dietz, P.; Garzke, M.; Schellbach, J.: FEM-Analyse innenhochdruckgefügtter Welle-Nabe-Verbindungen. 1. MSC-Technologie-Konferenz, 5./6.6.2000, Bad Kissingen.

Rouibah, K.; Schmitt, R.; Caskey, K.; Goltz, M.: The SIMNET Parameter Based Approach Eases Inter-Company Engineering Change Management. International Conference on Concurrent Enterprising – ICE 2000, 28.-30.6.2000, Toulouse.

Heimannsfeld, K.; Johnson, J.; Herzog, E.; Düsing, C.: Beyond Tool Exchange – Current Status and Future Implications of the Emerging ISO Standard AP233. 2<sup>nd</sup> European Conference on Systems Engineering (EuSEC 2000), Sept.2000, München.

Goltz, M.; Schmitt, R.: Product Data Controlled Workflow in the Supply Chain. ProSTEP Science Days 2000.

Goltz, M.; Schmitt, R.; Vanden Bossche, M.: Managing the Development and Engineering Changes of Complex Products in a Distributed Engineering Environment. eBusiness and eWork 2000. 18.-20.10.2000, Madrid.

Dietz, P.; Tan, L.; Schäfer, G.; Garzke, M.: Elastisch-plastische Auslegung geschwächter Pressverbindungen. Seminar „Welle-Nabe-Verbindung: Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 24./25.10.2000, Chemnitz

### Veröffentlichungen 2001

Düsing, C.: The emerging ISO Standard STEP AP-233 - A key enabler for systems engineering across different domains. International Symposium on Systems Integration; Baden Baden; 2001

Düsing, C.: Neue Möglichkeiten der Produktentwicklung mit STEP - AP-233 3. Workshop Konstruktionstechnik; Rostock; 2001

Müller, N.; Trenke, D.: Rapid Prototyping und Rapid Tooling am Institut für Maschinenwesen, Begleitband zur Informationsveranstaltung, IMW, 02.02.2001, Clausthal-Zellerfeld

Trenke, D.: Die Rapid Tooling Verfahrenskette, Vortrag, 8. Fachausschuss der Deutschen Keramischen Gesellschaft, CUTEC, 10. Mai 2001, Clausthal-Zellerfeld

Trenke, D.: Anwendung von Rapid Prototyping und Rapid Tooling in der Produktentwicklung, Informationstechnologie - Grundlagen und Anwendungen, Tag der Forschung 2001, TU Clausthal, 25. Mai 2001, Clausthal-Zellerfeld

Mupende, I.: Beanspruchungs- und Verformungsverhalten des Systems Trommelmantel - Bordscheiben bei mehrlagig bewickelten Seiltrommeln unter elastischem und teilplastischem Werkstoffverhalten. Dissertation, TU Clausthal, Cuvillier Verlag Göttingen, 2001

Dietz, P.; Mupende, I.; Otto, S.: Der Einfluss des Rillungssystems auf die Bordscheibenbelastung Zeitschrift Fördern und Heben März 2001

Otto, S.: Bauelement zur Bewegungsumwandlung in Verbrennungsmotoren Kurbelschleife TU Contact Juni 2001

Wächter, M.: BLK-Projekt: Länderübergreifende Entwicklung und Erprobung integrierter modularer Studienangebote unter Einbeziehung informations- und kommunikationstechnischer Medien am Beispiel der Ingenieurwissenschaften, Abschlussbericht AP4 Internationalisierung, 2001

Dietz, P.; Tawil, M.: 3D-Produktmodellierung in der Entwicklungskette - Aufwand und Nutzen. VDI-Tagung "Informationsverarbeitung in der Produktentwicklung 2001 - Effiziente 3D-Produktmodellierung - Fortschritte und Fallstricke", 19.-20. Juni 2001, Stuttgart - anlässlich CAT Engineering 2001

Heider, G.: Konstruktive Gestaltung von Steuerungen für Hochleistungskolbendampfmaschinen. Dissertation TU Clausthal 2001

Große, A.: Interdisziplinäre Werkstoffauswahl durch Aufbau eines Material Data Mart. Dissertation TU Clausthal 2001

Garzke, M.: Auslegung innenhochdruckgefügtter Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung. Dissertation, TU Clausthal, VDI Verlag 2001

Schäfer, G.: Betriebs- und Verschleißverhalten von Zahnwellen-Verbindungen. Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2001, Chemnitz

Schäfer, G.: Berichte aus der Praxis zur Fertigung von Zahnwellenverbindungen. Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2001, Chemnitz

Birkholz, H.: Die Auswahl der geeigneten Welle-Nabe-Verbindung - Längsstift-Verbindungen als Alternative? Seminar „Zahnwellenverbindungen und Pressverbindungen“, VDI Bildungswerk, 27./28.03.2001, Chemnitz

Dietz, P.; Garzke, M.: Numerische und experimentelle Untersuchungen an innenhochdruckgefügtten Pressverbindungen unter Drehmomentbelastung, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Schäfer, G.: Verschleißverhalten flankenzentrierter Zahnwellenverbindungen, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Düsing, C.: Neue Möglichkeiten der Produktentwicklung mit STEPP - AP-233, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Dietz, P.; Grünendick, T.: Bauteilkonstruktion mit kombinierten Werkstoffen - Möglichkeiten und Grenzen am Beispiel verfahrenstechnischer Maschinen, 3. Workshop Konstruktionstechnik, 20./21.09.2001 Rostock-Warnemünde

Schäfer, G.: Elastisch-plastische Auslegung geschwächter Preßverbindungen, Seminar „Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 23./24.10.2001, Chemnitz

Schäfer, G.; Grünendick, T.: Preßverbindungen durch Innenhochdruckfügen, Seminar „Preßverbindungen für höchste dynamische Belastungen“, VDI Bildungswerk, 23./24.10.2001, Chemnitz

## Autoren

*Backhaus, Stefan:* Jahrgang 1975, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.6.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. backhaus@imw.tu-clausthal.de

*Birkholz, Hagen:* Jahrgang 1967, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.9.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. birkholz@imw.tu-clausthal.de

*Dietz, Peter:* Jahrgang 1939, studierte Maschinenbau an der TH Darmstadt, wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Getriebe der TH Darmstadt, Promotion 1971 über die Berechnung von Seiltrommeln, seit 1974 Leiter der Stabstelle Konstruktionssysteme der Pittler Maschinenfabrik AG, Langen, seit 1977 dort Leiter der Entwicklungsabteilung, seit 1.10.1980 Universitätsprofessor und Institutsdirektor des IMW. dietz@imw.tu-clausthal.de

*Dschiwischow, Wüsal:* Jahrgang 1977, studierte Maschinenbautechnologie an der TU Aserbaidzhan, seit 1.10.2000 Gastwissenschaftler am IMW. wuesal.dschiwischow@tu-clausthal.de

*Düsing, Carsten:* Jahrgang 1972, studierte Geophysik an der TU Clausthal, seit 1.2.1999 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. duesing@imw.tu-clausthal.de

*Goltz, Michael:* Jahrgang 1973, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. goltz@imw.tu-clausthal.de

*Grünendick, Torsten:* Jahrgang 1967, studierte Luft- und Raumfahrttechnik an der Universität der Bundeswehr München, von 1993 bis 1996 Fachgruppenleiter bei einem Luftfahrzeugtriebwerks - Instandsetzer in Erding, ab 1996 dort Leiter Qualitätssicherung, seit 1.8.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. gruenen@imw.tu-clausthal.de

*Käferstein, Berthold:* Jahrgang 1973, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.5.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. kaefer@imw.tu-clausthal.de

*Müller, Dirk:* Jahrgang 1969, studierte Technomathematik an der TU Clausthal, seit 1.1.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. dmueLLer@imw.tu-clausthal.de

*Müller, Norbert:* Jahrgang 1449, studierte allgemeinen Maschinenbau an der FH Frankfurt und TH Darmstadt, Leiter Zentralaufgaben Konstruktion der Pittler AG, wiss. Mitarbeiter am IMW, Promotion 1990 über rechnergestützte Konstruktion verfahrenstechnischer Maschinen am Beispiel von Zentrifugentrommeln, Bereichsleiter Informationstechnik der Pittler GmbH, seit 1.11.1997 Professor für Rechnerintegrierte Produktentwicklung am IMW. mueller@imw.tu-clausthal.de

*Mupende, Ilaka:* Jahrgang 1964, studierte allgemeinen Maschinenbau an der Universität Kinshasa, Demokratische Republik Kongo, seit 1.10.1996 Gastwissenschaftler am IMW. mupende@imw.tu-clausthal.de

*Niklaus, Jörg:* Jahrgang 1972, studierte Geologie an der TU Clausthal, seit 1.2.2001 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. niklaus@imw.tu-clausthal.de

*Otto, Steffen:* Jahrgang 1971, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.8.1998 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. otto@imw.tu-clausthal.de

*Qingsong, Hua:* Jahrgang 1975, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Liaoning, VR China, seit 01.04.01 Gastwissenschaftler am IMW. mwqh@imw.tu-clausthal.de

*Schäfer, Günter:* Jahrgang 1963, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.89 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW, seit 1991 akademischer Rat, Promotion im November 1995 über Verschleiß und Berechnung von Zahnwellenverbindungen. schaefer@imw.tu-clausthal.de

*Siemienieć, Adam:* Jahrgang 1929, Professor am Lehrstuhl für Technische Mechanik der Bergakademie Kakau. ad\_siem@uci.agh.edu.pl

*Tawil, Mohamed:* Jahrgang 1969, studierte Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.11.1997 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. tawil@imw.tu-clausthal.de

*Trenke, Detlef:* Jahrgang 1969, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.10.2000 wissenschaftlicher Mitarbeiter am IMW. trenke@imw.tu-clausthal.de

*Wächter, Martina:* Jahrgang 1959, studierte allgemeinen Maschinenbau an der TU Clausthal, seit 1.4.1985 wissenschaftlicher Mitarbeiterin am IMW.  
waechter@imw.tu-clausthal.de

*Wolny, S.:* Jahrgang 1949, Leiter des Lehrstuhls für Technische Mechanik der Bergakademie Krakau.  
stwolny@uci.agh.edu.pl